

論文

デジタル技術実装の趨勢と 可変スコープ型建設生産システム開発

— ボトムアップ型技術，スピルオーバー効果，問題提起型事業 —

善本哲夫*

要旨

本稿の目的は本邦の中小建設業者によるボトムアップ型技術開発，大手・準大手ゼネコンからの技術のスピルオーバー効果，スタートアップ企業による新技術の事業化のありようから，適用規模の自由度を持った「可変スコープ型」の自動化施工システム開発に向けた論点を描き出すことにある。建設業界は自動化施工の高度化によって高効率生産システム確立およびシステム最適化志向を目指している。本稿は自動化施工システムに不可欠な論点として，工事規模・企業規模を規定しない実装自由度の高さと，現場が持つ建設フレキシビリティ能力活用の両軸を提示する。以上から，フレキシビリティと実装スコープの可変性を持たせた自律施工技術ベースのシステムを新たな建設生産システム開発の方向性の一つとして提起する。

キーワード

建設プロセス革新，自動化施工，実装スコープ，可変スコープ型建設生産システム，フレキシビリティ

* 立命館大学経営学部 教授

目 次

1. はじめに
2. 中小建設業によるボトムアップ型研究開発：阿部建設および愛亀
 - 2.1 中小建設業者による革新的技術導入・活用の取り組み
 - 2.2 阿部建設（小樽市）
 - 2.3 愛亀（松山市）
 - 2.4 中小建設業のボトムアップ型技術開発
3. 自動化施工の実用化とスピルオーバー：鹿島建設の A⁴CSEL
 - 3.1 自律施工技術のシステム化
 - 3.2 鹿島建設の A⁴CSEL
 - 3.3 システム化技術のスピルオーバーへの期待
4. スタートアップによる問題提起：Polyuse の建設 3D プリント
 - 4.1 建設 3D プリンティング
 - 4.2 Polyuse
 - 4.3 スタートアップによる問題提起型事業
5. インプリケーション：可変スコープ型建設生産システム構築に向けて
 - 5.1 中小建設業者が有する変動対応力の束：建設フレキシビリティ能力
 - 5.2 デジタル実装と変動対応力の共鳴
 - 5.3 オープン・プラットフォーム開発と活用：実装スコープの可変性
6. おわりに

1. はじめに

本稿の目的は本邦建設業の 3 つのケースをもとに、適用規模の自由度を持った「可変スコープ型」の自動化施工システム開発に向けた論点を描き出すことにある¹⁾。i-Construction が提唱された 2015 年以降、同業界ではその推進をトリガーにデジタル技術の活用が加速化している²⁾。従前より無人化施工、自動化施工の開発は盛んであるが、本研究のフォーカスは建設業が強みとする高い変動対応力をさらに強みとして活かし、デジタル技術実装（以下、デジタル実装）とのシナジー効果をいかに生産システムとして具現化するのか、にある。

建設プロセスの特徴は ①非量産性、②自然依存性、③作業環境の一過性、④社会環境依存性、⑤複合専門性、⑥労働集約性、として整理することができる（産業競争力懇談会〔2016〕）。建設プロセスは属地性が高く、プロジェクトによって施工現場が変わる移動生産が基本であり、施工条件が常態的に変化する。つまり、非定常的・変動的な状況の中で常時のオペレーションを実行するため、現場に合わせて施工のありようを柔軟に変えるフレキシビリティの高さが施工のポイントになってくる。

非定常性・変動性への対応は新たな建設プロセスの研究開発の推進力でもあり、その成果導入によって QCTS パフォーマンス（Quality：品質・Cost：コスト・Time：時間・Safty：安全）の向上が図られている。建設業ではそうした研究開発成果を受注施工現場で試行錯誤的に実践することが多い。つまり、ターゲットとする施工条件での問題解決に向けた研究開発成果の実証実験を受注現場の施工に導入する。このように建設業者によるビジネスはヒューリスティック

な実証実験型のオペレーションを内包する。

建設業ではデジタル技術活用の試行錯誤的なプロセス革新が2015年以降から加速的に動き出している。国土交通省が旗振りをした i-Construction 提唱を皮切りに、建設 DX やインフラ DX といった呼称で展開されるプロセス革新は、研究開発成果の具体的実用化を念頭にますます試行錯誤的施工を加速化させる様相を見せている。

建設業にみるデジタル実装トライアルと成果普及・実用化の狙いの一つに、建設生産技術のさらなるシステム化と自動化への強い志向がある。情報化施工を基軸とする i-Construction をはじめ、自動化施工や建設ロボットの実用化などを通じた高効率生産システム確立およびシステム最適化志向は、「建設現場の工場化」と表現されることもある³⁾。最先端のデジタル実装と建設生産技術をシステム化することで、建設プロセスのモデル化を実現することが「工場化」のコンテキストにあるとあってよい。その一つのあるべき姿が自律分散制御型の建設生産システムである。

付加価値生産性の伸び悩みと労働力不足の背景、そしてデジタル技術の進歩が「現場の工場化」、つまり、さらなる建設生産技術システム化へと同業界を駆り立てる。こうした流れにおいて重要なポイントは、変動的な施工現場属性にどのように対応するか、そのシステム化思想にあるといえる。筆者は、熟練技能者を中心に本邦建設業が培ってきた常態的変動性に向き合う能力、つまり変動対応力をいかに建設生産のシステム化要素として組み込むことができるか、が重要な論点になると考えている（善本〔2022〕）。以上のように、建設現場が内包する常態的変動性の中で柔軟に変動を取りさばく知見やノウハウ等を「フレキシビリティ能力」の文脈で評価・位置づけし、それらとデジタル実装を共鳴させるシステム構築のシナリオが、建設プロセス革新を導く上で不可欠となる。

以上の視点と合わせ、自動化施工による建設業界活性に不可欠な論点はシステム実装先の工事規模・企業規模を規定しない自由度の高さである。実装する企業・工事規模や適用範囲を本稿では実装スコープと呼ぶ。本邦地方圏の社会インフラ整備・維持の多くを中小建設業が担っている。そのため、実装スコープを問わない自律施工技術のシステム化を実現することが重要になってくる。つまり、フレキシビリティと実装スコープの可変性を持たせたシステム開発が建設生産システムに求められてくる。

本稿では建設生産技術システム高度化のあるべき姿を「可変スコープ型建設生産システム」に設定し、次の3つのケースから実態を紐解くことでその実現シナリオ作成に向けた着眼点を素描してみる。建設プロセス革新に向けたフィードフォワードのありようを探ることも、本稿の目的の一つである。

本稿はデジタル実装を基軸とする実証実験型の試行工事に積極的なチャレンジ姿勢を持つ中小建設業2社に目を向ける。これら企業はデジタル実装に積極的であり、内閣府・官民研究

開発投資拡大プログラム (PRISM) の枠組みを活用した国土交通省のプロジェクト公募に応募、採択されるなど、新たな技術を使った試行工事に果敢にトライしている。PRISM による国土交通省のプロジェクトは成果の業界内や他社への横展開と普及がミッションであり、中小建設業のデジタル実装を先導する役割も担っている。

自動化施工および無人化施工の技術開発やシステム化などの生産工学アプローチを先導するのは、大手・準大手ゼネコンや建機メーカーである。本稿では、自動化施工をすでに建設技術として確立し、大規模施工を展開している大手ゼネコン 1 社に目を向ける。同社の自動化施工は世界の先頭を走っており、さらなる研究開発とシステム高度化に期待が高まっている。他方で、大手ゼネコンによる新工法や施工システムは、社内展開に限られたクローズドな囲い込み技術とする傾向も伺える。いわば、大手・準大手ゼネコンによる開発競争の様相も見て取れるわけだが、しかし、そのことが技術進歩のスピードを上げることに結びついている。この加速度的な研究開発から期待されるのは、中小規模工事でも利用できる技術の大手・準大手からのスピルオーバーである。中小建設業者がトライできない規模の試行や大きなチャレンジが、建設技術とデジタル実装の先端性を導いていく。

また、建設 DX に新たな事業機会を見出し、建設スタートアップ企業が新たな建設技術開発で業界参入をみせている。本稿は新たな建設生産技術として注目を浴びている 3D プリンティングに目を向けてみる。

以上、筆者が本稿執筆時 (2021 年下半期～2022 年上半期) で着眼している動向は、地方の挑戦意欲に溢れる中小建設業者によるボトムアップ型の技術開発・実用化、大手・準大手ゼネコンによる研究開発成果のスピルオーバー、そしてスタートアップ企業による新たな建設生産技術事業化の 3 つである。これら 3 つの挑戦的な動きを交錯させ、それを着火点に建設生産システムの新たな方向性を導く論点として、本稿では「フレキシビリティ」と「実装スコープ」に目を向ける。特に、建設業において非定常的な状況に対応するノウハウ等の「変動対応力の束」を本稿では「建設フレキシビリティ能力」と呼ぶ。

本稿の構成は以下の通りである。最初に中小建設業者によるデジタル実装への取り組みを紹介し、その後、大手ゼネコンによる自動化施工のありようを取り上げる。次に建設スタートアップによる新たな建設生産技術開発の様相に着目する。最後にこれら 3 つのケースをもとに「可変スコープ型建設生産システム」に向けたインプリケーションを考える。

2. 中小建設業によるボトムアップ型研究開発：阿部建設および愛亀

2.1 中小建設業者による革新的技術導入・活用の取り組み

道路や橋梁など、我々が当たり前利用している社会インフラは維持・メンテナンス・補修

が不可欠であり、また、台風、大雨、地震など自然災害に被災した地域の復旧・復興を土木建設工事から支えるのは、地場の中小建設業者である。しかしながら、深刻化する就業者の不足と高齢化は地場建設業の事業継続を困難なものとし、地域での日常生活に大きな負の影響を及ぼすことになる。厳しい事業環境に直面する中小建設業者のみならず、地域社会にとっても同業界の生産性向上は待たなしの状況にある。

国土交通省による i-Construction 推進、建設・インフラ DX の議論を背景に、高い挑戦意欲を持つ地場の中小建設業者が積極的にデジタル実装へ取り組むようになってきている。本稿では地方圏でデジタル実装に取り組む企業である北海道小樽市の阿部建設株式会社（以下、阿部建設）ならびに愛媛県松山市の株式会社愛亀（以下、愛亀）の 2 社の取り組みを紹介する。

図 1 は PRISM 枠組みを活用している国交省「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」（以下、国交省 PRISM）の試行内容（概要）の紹介である。当該事業はデジタルデータを活用する新技術試行工事プロジェクトを募集し、デジタル実装による新たな建設・更新モデル確立を目指すものである。両社は国交省 PRISM の公募で、複数回の採択実績を持っている。国交省 PRISM に採択されたプロジェクトは、研究開発を進める技術の普及拡大が前提となっている。本稿で取り上げる阿部建設と愛亀の両社は中小建設業者による i-Construction 推進、デジタル実装のモデルケースになっているともい

建設現場の生産性を飛躍的に向上するための 革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト



- 建設現場からデジタルデータをリアルタイムに取得し、これを活用したIoT・AIをはじめとする新技術を試行することで、建設現場の生産性を向上するプロジェクトを公募。

<スケジュール>

7/11～8/10
9月
10月

公募期間
WGにおいて審査・選定
選定結果の公表・契約締結

<応募要件>

- 以下を含むコンソーシアム（予定者を含む）
 - ✓ 国交省等の発注工事を受注している建設業者
 - ✓ IoT・AI等関連企業等（建設業者以外の者）
- 提案内容は、H30年度に現場で試行
- 取得データはクラウド環境等により、随時、発注者等と共有

<技術提案内容>

- データを活用して施工の労働生産性の向上を図る技術
 - 土木工事の施工において、データを取得し、当該データを活用して新技術等を試行することによりコンクリート工（橋梁、ダム、トンネル）や土工等の労働生産性の向上（作業員の省人化、施工時間の短縮（休日の拡大等））を図る技術の提案を求める。
- データを活用して品質管理の高度化等を図る技術
 - 土木工事の施工において、データを取得し、当該データを活用して現行の品質管理手法を代替することが見込まれる品質管理手法（現行基準における試験方法や数値等の代替手法、監督・検査・確認の代替手法、書類の削減・簡素化等）の提案を求める。

<経費>

人件費・機械経費・情報通信経費・設備費・諸経費等に充当
※平成30年度官民研究開発投資拡大プログラムの推進費にて実施

出所）国土交通省〔2018〕より借用。

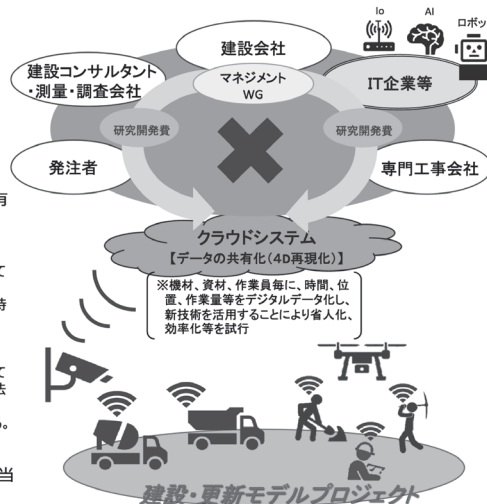


図 1 国交省 PRISM の概要紹介（初年度）

える。以下、国交省 PRISM で令和 3 年度 (2021 年度) に採択された「技術 I : AI, IoT を始めとした新技術等を活用して土木又は建築工事における施工の労働生産性の向上を図る技術」(以下、技術 I) の阿部建設と、「技術 II : データを活用して土木工事における品質管理の高度化等を図る技術」(以下、技術 II) および試行的に ICT 施工に取り組んだ愛亀の取り組みに目を向けていく。

2.2 阿部建設 (小樽市)

阿部建設は北海道小樽市に本社を持つ 1949 年設立の建設会社である。同社は小樽市をはじめ、余市町や仁木町、ニセコ町など後志管内で多くの施工実績を持っている。2021 年度の北海道開発局優良工事等表彰 (北海道 一般国道 5 号 仁木町 町道 2 番地通橋下部工事)、また、同局 2021 年度「北海道開発局 i-Con 奨励賞」を受賞するなど、地場業者としてその施工能力、i-Construction 普及推進への貢献など、高い評価を得ている中小建設業者である。

阿部建設が受賞した i-Con 奨励賞の概要は図 2 である。同図にも記載されているように、当該賞は「北海道開発局 i-Con 奨励賞 事務取扱要領」で「北海道開発局が所管する工事及び業務 (以下「工事等」という。) に関し、建設現場における生産性向上の優れた取組を行った受注者を表彰することにより、建設業に携わる企業の i-Construction 導入に向けた意欲向上を図るとともに、優れた取組事例を広く収集し周知することで、より一層の i-Construction 推進を図ることを目的とする」⁴⁾ とし、選考対象工事等に ICT 施工、ICT を活用した施工管理・工程管理などの取り組みに言及し、その基準では生産性向上への有効性、その先進性ととも「他の模範として波及性が認められる取組」⁵⁾ であることが明記されている⁶⁾。つまり、阿部建設の能動的姿勢と取組内容は他業者のレファレンスモデルとしての役割が期待されているものといえる。

以上のように、デジタル実装に積極的である同社は令和 3 年度 (2021 年度) の国交省 PRISM 技術 I に採択されており、試行工事は北海道の「一般国道 5 号 仁木町 銀山大橋 P 5 橋脚工事」(以下、阿部建設 PJ) である。銀山大橋は倶知安余市道路として共和町から余市町を結ぶ一般国道の自動車専用道路の橋長 566m の橋梁である。図 3 は倶知安余市道路の概要である。阿部建設 PJ は銀山大橋下部の橋脚新設工事であり、内容は RC 橋脚工、写真 1 は現場風景である。

図 4 は阿部建設 PJ の概要である。図 5 は各取り組み内容を整理したものである。同社は遠隔臨場による移動時間削減や書類削減ペーパーレス化、デジタル映像情報の積極的活用や、鉄筋構造物の写真計測による三次元再構築で非接触検査にトライするなど、多彩なデジタル実装にチャレンジしている。

建設工事は新たな施工や技術を実際の現場で試行錯誤的に使用する実証実験型オペレーショ

ンを実践することが多いわけだが、当該PJが興味深いのは、発注側である北海道開発局小樽開発建設部と受注側の阿部建設がデジタル実装による生産性向上に向けて協働していることである。ヒューリスティックな試行工事の程度が強ければ強いほど、その施工は発注側とのコンセンサス形成が重要である。図5中の「①リーマンマネジメントの受発注者での運用体系化と技術展開」で記載されているように、映像情報を活用する遠隔臨場について、発注側と受注側によるコンセンサスによって協働チャレンジが実践されている。例えば、鉄筋検査では360度ネットワーク型カメラで撮影した鉄筋全景をクラウド上で共有、また、クラウド上で指示された任意箇所の写真計測によって現場での3次元再構築を実施し、検査を受けることを可能とした。これにより、P5橋梁工事現場への移動時間や待機時間が削減される。写真2はP5橋脚に設置されたデジタル機器である。これらは特注品ではなく、既製品の360度ネットワーク型カメラやスマートフォンなどを活用し、ハード機材の導入コストを抑える工夫がなされている。

阿部建設PJにみる官民協働の展開は、発注側である北海道開発局のデジタル実装への積極的姿勢の意味合いも大きい。小樽開発建設部は「i-Constructionモデル事務所」であり、ここが有するノウハウの北海道内への展開が期待されている。図6にあるように、小樽開発建設部のノウハウ展開のための「i-Construction先導事業所」が北海道内に設置されている。ここで言及されているように、i-Constructionやデジタル実装を「地方自治体や地元業者等へ普及拡大」することが目的となっている。阿部建設PJはモデル事業所である小樽開発建設部とともに、北海道内でもデジタル実装の先導的な役割を果たす工事であるといつてよい。

『北海道開発局 i-con奨励賞』創設！～地域の未来を支える建設業の健全な発展を後押しするため、建設業等の働き方改革の取組を行っています。働き方改革の重要な取組の一つであるi-Construction[※]の普及促進に向け、新たに『北海道開発局i-con奨励賞』を創設し、建設現場における生産性向上の優れた取組を表彰します。

R2.2.6
局長会見
国土交通省
北海道開発局

背景

暮らしや産業を支える社会資本の整備や維持管理の担い手として、また激甚化・多様化する災害に対する地域の守り手として、建設業界の果たすべき役割はますます重要となっています。一方、北海道は全国よりも10年先行して人口減少や高齢化が進んでいます。こうした中においても引き続き建設業界がその役割を果たすために、担い手の安定的確保・育成に向けて、建設業の労働環境の改善などの取組を進めるとともに、限られた人員の中、品質と安全性の確保に向けて建設現場の生産性向上をより一層進める必要があります。

国土交通省では、建設現場における生産性を向上させ、魅力ある建設現場を目指す新しい取組であるi-Constructionを推進しており、北海道開発局においても、『北海道開発局i-Constructionアクションプラン』を策定し、普及促進、技術向上に努めています。

i-Construction普及に向けた新たな取り組み

今回、建設現場における生産性向上の優れた取組を表彰することにより、建設産業に携わる企業のi-Construction導入に向けた意欲向上を図るとともに、優れた取組事例を広く周知することで、より一層のi-Construction推進を図ることを目的として、新たに『北海道開発局i-con（アイ・コン）奨励賞』を創設することとしました。

※i-Construction（アイ・ストラクチャー）とは…調査・測量から設計、施工、維持管理までのあらゆる建設生産プロセスでICT（情報通信技術）等を活用して建設現場の生産性向上を図る取組です。建設現場の生産性向上を実現するため、トッパナー施策を先行的に進め、得られた知見等を踏まえて他の施策へ展開し、全ての建設現場への浸透を図ります。

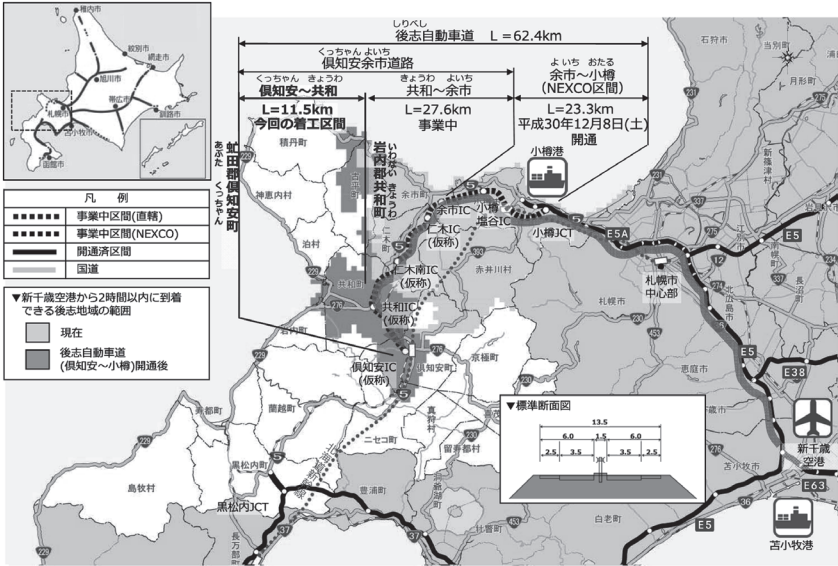
●トッパナー施策

- ①ICTの全面的な活用（ICT活用工事等）
- ②全体最適の導入（コンクリート工の規格の標準化等）
- ③施工時期の平準化

出所) 北海道開発局〔2020〕、1ページより借用。

図2 北海道開発局 i-Con 奨励賞の概要

- 俱知安余市道路（俱知安～共和）は、後志自動車道のうち俱知安町から共和町を結ぶ延長約11.5kmの一般国道の自動車専用道路です。
- 本道路は、俱知安余市道路（共和～余市）、北海道横断自動車道（余市～小樽）と一体となり、後志地域と新千歳空港や苫小牧港などを結び、後志地域における世界水準の観光地形成や多種多様な食の生産空間の維持・発展を支援します。

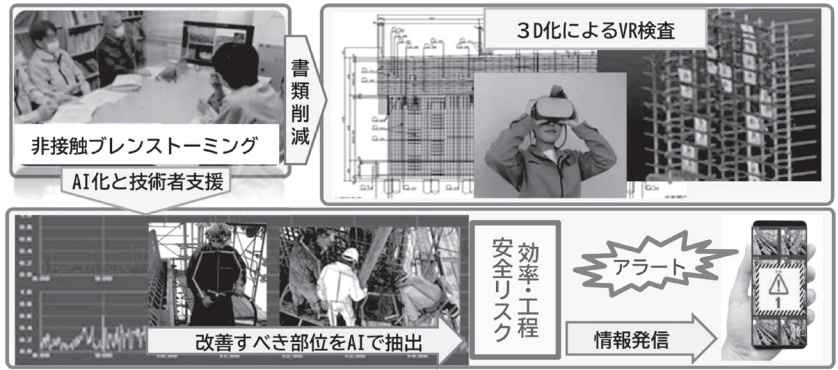


出所) 北海道開発局〔2018〕より借用。

図 3 俱知安余市道路整備事業の概要

コンソーシアム: 阿部建設、環境風土テクノ、北海道大学大学院、立命館大学、北海道産学官研究フォーラム、堀口組、建設IoT研究所
 試行場所: 一般国道5号 仁木町 銀山大橋P5橋脚工事

- ・リーマンネジメントの発想で非接触下における施工管理の効率化を図る。
- ・映像代替による書類の削減
- ・映像解析データを活用したAI化と技術者支援



出所) 国土交通省〔2021 c〕, 3 ページより借用。

図 4 阿部建設PJの概要



出所) 阿部建設提供の資料。

図 5 阿部建設PJの各取り組み



北海道開発局 インフラDX・i-Construction先導事務所の設置



北海道におけるインフラDX・i-Constructionの取組を推進するため、各開発建設部に「インフラDX・i-Construction先導事務所」を設置し、「i-Constructionモデル事務所」である小樽開発建設部(小樽道路事務所)のノウハウを全道的に展開する取組を始めます。

i-Construction先導事務所の目的

全国モデル事務所として北海道のインフラDX・i-Constructionを牽引する小樽開発建設部(小樽道路事務所)のノウハウを、効率的に全道へ展開する

- ◆開建内へのDX・i-Conの取組ノウハウの展開
- ◆直轄工事や業務での取組推進
- ◆高スペックPC等の環境整備や研修受講等を優先的に実施
- ◆各地方公共団体の取組をサポート(見学会や勉強会の開催、相談窓口等)
- ◆地域の業者(工事・業務)の取組をサポート(トップランナー講習会の開催、相談窓口等)

モデル事務所の取組

- ブロック内で先進的な取組を実施
- ・i-Constructionに関するリーディング事務所として取組を推進
- ・直轄工事において、3次元情報活用モデル事業を実施(一般国道5号 倶知安余市道路)

先導事務所の取組

- 直轄工事で取組を推進
- ・ICT活用工事を実施
- ・BIM/CIM活用工事・業務を拡大
- ・3次元データの活用等
- 地方自治体や地元業者等へ普及拡大
- ・現場見学会による理解促進と担い手確保
- ・研修による人材育成(本局と連携)
- ・地方自治体におけるICT活用の支援等

i-Constructionモデル事務所 小樽開発建設部(小樽道路事務所)

No.	開建名	事務所名	部門
1	札幌	旭川河川事務所	河川
2		札幌道路事務所	道路
3	函館	函館道路事務所	道路
4	旭川	旭川河川事務所	河川
5		旭川道路事務所	道路
6	室蘭	苫小牧道路事務所	道路
7		室蘭港事務所	港湾
8	釧路	釧路道路事務所	道路
9		釧路港事務所	港湾
10	帯広	帯広河川事務所	河川
11		帯広道路事務所	道路
12	網走	北見道路事務所	道路
13	留萌	留萌開発事務所	道路
14	稚内	浜頓別道路事務所	道路

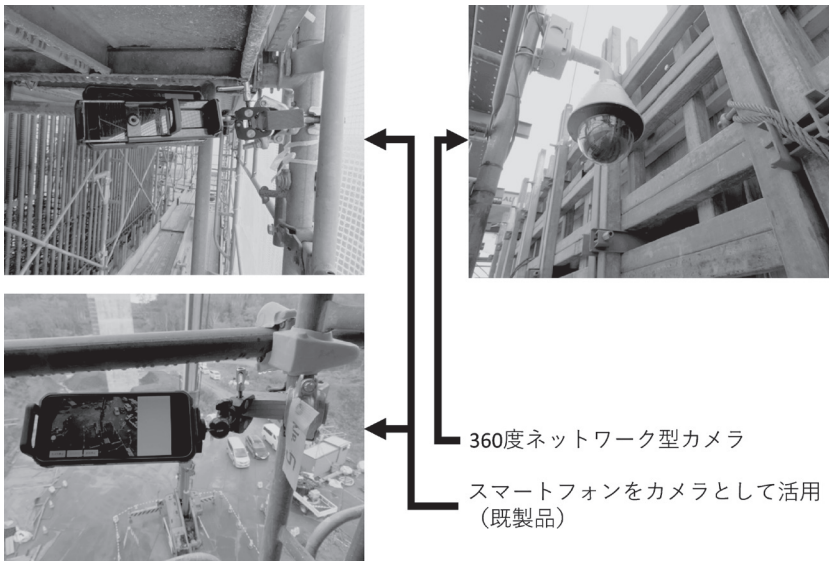
出所) 北海道開発局 [2021], 2 ページより借用。

図 6 小樽開発建設部ノウハウの普及拡大への取組



出所) 筆者撮影：2021年11月 (北海道仁木町, 協力: 阿部建設)

写真 1 阿部建設 PJ 銀山大橋 P5 橋脚工事



360度ネットワーク型カメラ

スマートフォンをカメラとして活用
(既製品)

出所) 筆者撮影：2021年11月 (北海道仁木町, 協力: 阿部建設)

写真 2 P5 橋脚に設置された映像記録用カメラ

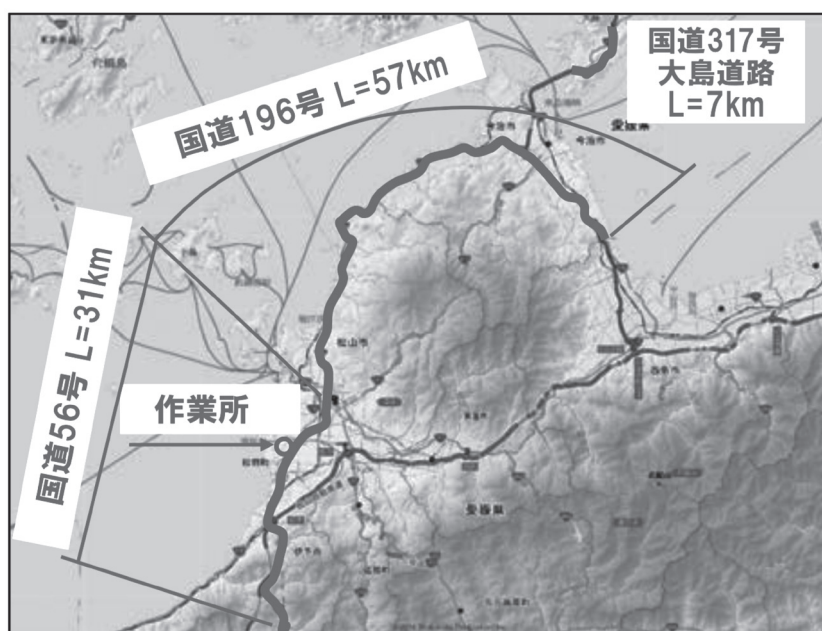
2.3 愛亀 (松山市)

愛亀は1957年に愛媛県松山市で金亀舗装株式会社として創業、2008年に現社名となった建設会社である。同社は松山市を中心に、伊予市や伊予郡松前町、今治市など中予地域や東予地域で「インフラの町医者」をコンセプトに多くの施工実績を持っている。また、同社は海外

進出にも積極的であり、インドやカンボジア、キルギスに事業展開を始めている⁷⁾。同社は道路事業部や管路事業部など事業部制を取っており、また多くの建機や建設機材を自社保有する、地場中小建設業者として規模が大きい会社である。また、国土交通省四国地方整備局松山河川国道事務所から優良工事として事業所長表彰（「平成 29-30 年度 松二維持工事」）、NEXCO 西日本市支社から安全管理優良賞、品質管理優良賞（「令和元年度 松山自動車道 伊予 IC～大洲 IC 間のり面防草対策工事」）を受けるなど、愛媛県内でも高い品質管理と施工能力を有している会社である。

同社は自走式カメラシステムや映像情報の利活用など新たな技術導入に積極的であり、例えば 2015 年には本州四国連絡高速道路株式会社の「平成 27 年度今治管内舗装補修他工事（西瀬戸自動車道）」で映像情報を活用した工事管理計画、CIM（Construction Information Modeling）の取組などで成果を上げている。より高いレベルでの施工能力獲得を目指し、国交省 PRISM に応募、採択されている。

同社は令和 3 年度（2021 年度）の国交省 PRISM 技術 II に採択されており、試行工事は愛媛県の「令和 3－4 年度松二維持工事」（以下、愛亀 PJ）である。松二維持工事とは、愛媛県の国道 56 号、国道 196 号、国道 317 号（大島道路）で実施する道路補修等の施工である。図 7 は同工事の施工区間である。この図は平成 30 年度（2018 年）の国交省 PRISM 技術 II の第 1 回公募で採択された取組成果の論文から借用している（黒河・春木〔2019〕）が、本稿が取り上

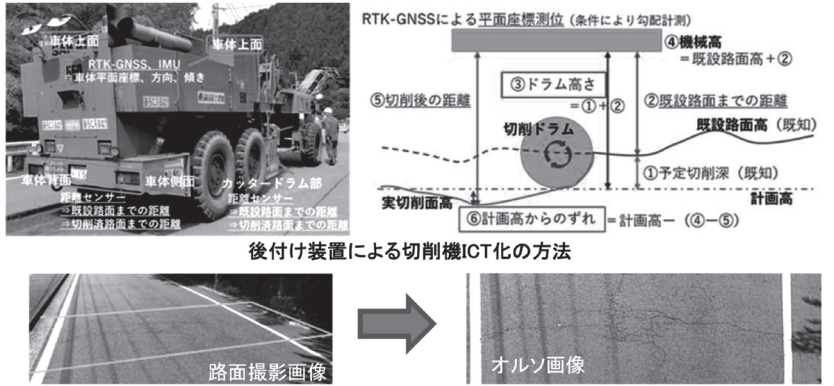


出所) 黒河・春木〔2019〕, 43 ページより借用。

図 7 愛亀 PJ の道路補修工事区間

コンソーシアム: 愛亀、環境風土テクノ、可児建設、立命館大学、応用技 No11 術、iシステムリサーチ
 試行場所: 令和3-4年度松二維持工事

- アスファルト路面切削機の後付け装置によるICT化
- 道路パトロールにおける路面損傷調査



後付け装置による切削機ICT化の方法



車載カメラによる画像をオルソ化して記録

出所) 国土交通省〔2021〕, 11 ページより借用。

図 8 愛亀 PJ の概要

【 路面切削システムの比較 】	愛亀PJ		愛亀MC	
	項目	後付け簡易型路面切削システム	RD-MC路面切削システム	
制御方法		MG		MC
適用機種		限定なし		機種限定
導入コスト		低コスト		非常に高価
通信ロスト		MGから従来方式へ		システム停止

出所) 愛亀の提供資料より借用。

図 9 愛亀 PJ と愛亀 MC の比較

ける 2021 年度の愛亀 PJ と同じ対象を現場としている。

図 8 が愛亀 PJ の概要であり、写真 3 はその施工風景である。同施工は切削オーバーレイ工法による道路舗装補修工事であり、そのプロセスの概略が写真 4 である⁸⁾。同写真の①～④はプロセスの流れを示している。①のように、まずは切削機のカッターで道路を削る。古いアスファルトを削った後の道路が②である。アスファルトの切削屑を③のようにダンプカーに積み込み、指定地まで運搬する。細かな切削屑はヒト作業と路面清掃車であるスイーパーで清掃する。④はヒト作業による清掃風景である。愛亀 PJ はこのオーバーレイ工法の路面切削機によ

るアスファルト舗装切削プロセスにおいて ICT を活用し、設計・測量・機械稼働・品質管理・出来形・出来高のデータ管理および記録を実施するものである。写真 5 は愛亀 PJ で切削機に取り付けた実証実験機材である。愛亀が保有する切削機への RTK-GNSS (Real Time Kinematic-Global Navigation Satellite System) やヨーヨーセンサ、レーザ変位センサ等をシステム化した後付け装置により、データ管理・記録による出来高管理と MG (Machine Guidance) 機能を付与するものである。当該取り組みは、切削機の新旧モデルを問わずに後付け装置として機能すること、また導入コストを低く抑えることをターゲットにしており、中小建設業者、中小規模工事支援を狙った研究開発である。

また、愛亀は国交省 PRISM と合わせて、同じ松二維持工事で同じ切削機による ICT 施工を同時並行で実施している。写真 6 は当該 ICT 施工の様子であり、レンタル大手の西尾レントオールと協働で路面切削システムの実証実験オペレーションを展開したものである。この ICT 施工は愛媛県内において初めて実施された、施工前の現況データと設計データ（三次元）とを比較しながら MC (Machine Control) を実践する実証実験型オペレーションである（以下、愛亀 MC）。同社は愛亀 PJ を「後付け簡易型路面切削システム」、愛亀 MC を「RD-MC 路面切削システム」と呼称している。愛亀 MC は愛亀 PJ と同じく切削機に後付け装置でデジタル実装するものであるが、それら機器はすでにシステム商品（商品名：RD-MC）として販売されているものである⁹⁾。そのシステムを使った試行および検証を西尾レントオールと共に実施したわけである。写真 6 では切削機に後付けした GNSS アンテナとコントロールボックスを示している。

愛亀は国交省 PRISM および ICT 施工の実証実験を広く見学者を募り、公開見学会を開催



出所）筆者撮影：2021年11月（愛媛県砥部町，協力：愛亀）

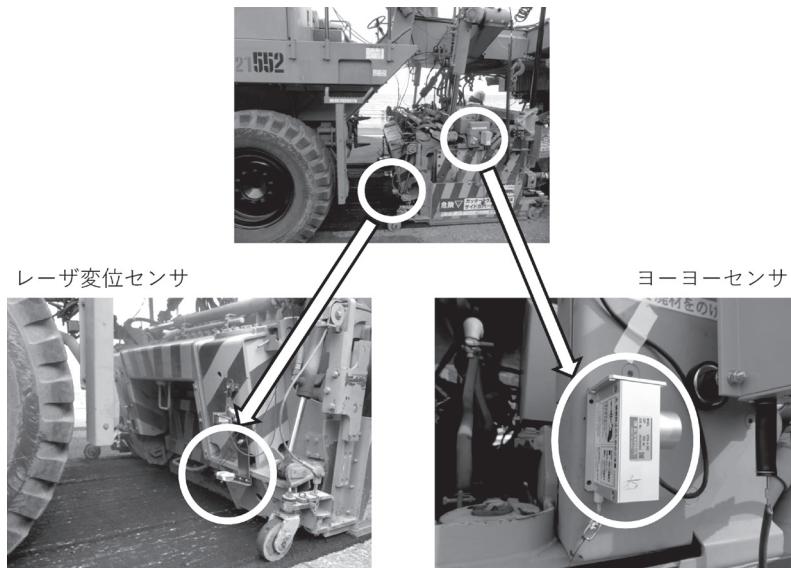
写真 3 愛亀 PJ の路面切削の風景

することで自らの成果共有と意見交換の場を設定した。写真 7 は地方行政関係者や愛媛県内地場建設業者等が参加した公開見学会の風景である。図 9 は当該公開見学会で配布された、愛亀 PJ と愛亀 MC を比較評価した同社資料であり、導入コストや後付け可能な機種への言及がある。愛亀 PJ で「簡易型」として開発が進められている背景には、中小建設業者のデジタル実装支援がある。システム商品に比べて導入コストを低く、また新旧モデルを問わずに後付



出所) 筆者撮影：2021年11月(愛媛県砥部町, 協力: 愛亀)

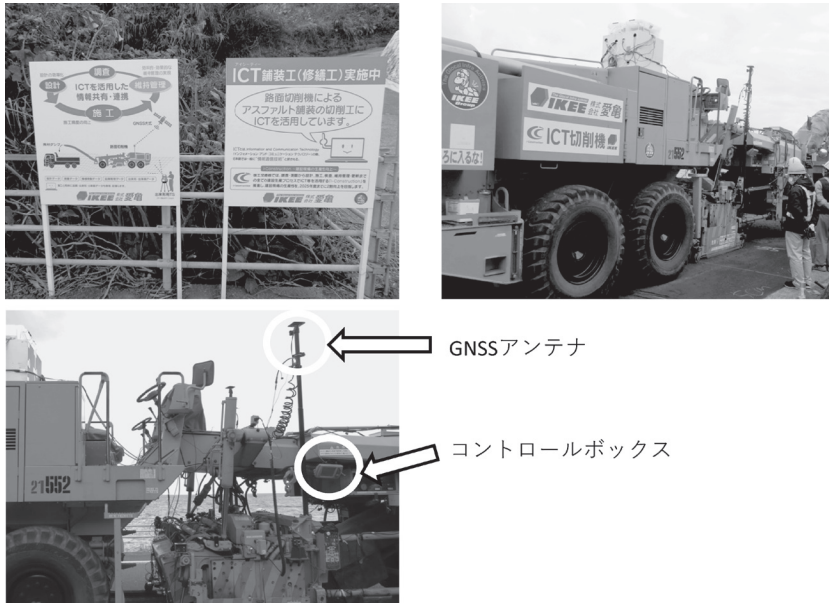
写真 4 道路切削プロセス



出所) 筆者撮影：2021年12月(愛媛県伊予市, 協力: 愛亀)

写真 5 愛亀保有切削機へのデジタル機材の後付け

けできる仕組みの構築が愛亀 PJ の目指す開発方向性である。他方、簡易型であるため MG の域を出ず、MC のような自動制御機能は持ち合わせていない。2 つの路面切削システムのメリットとデメリットを整理する愛亀 PJ は、中小建設業者が投資余力や現場事情に応じて導入コストと求める機能を検討する土台提供の役割を果たすものとなっている。



出所) 筆者作成：2021年12月（愛媛県伊予市，協力：愛亀，西尾レントオール）

写真6 愛亀による ICT 施工（愛亀 MC）



出所) 筆者作成：2021年12月（愛媛県伊予市，協力：阿部建設）

写真7 愛亀 PJ および愛亀 MC の公開見学会（同じ現場，同じ機械）

2.4 中小建設業のボトムアップ型技術開発

国交省は i-Construction 推進のもと「中小企業等の ICT 施工活用環境の充実」として中小建設業者へのデジタル実装支援を展開している。例えば、2021年には「特に中小企業や地方公共団体への更なる普及拡大に向けて、従来の建設機械に後付けで装着する機器を含め、

ICT 建設機械を認定する制度の創設や、作業員の負荷軽減に向けたパワーアシストスーツ等の試行等に取り組みます。加えて、中小企業を含むあらゆる現場への ICT 施工の利活用環境充実に向け、入札時に生産性向上の取組を評価する取組の試行、構造物の出来形管理や路盤工への ICT 活用拡大などに取り組みます」¹⁰⁾ とし、図 10 を公表している。

しかしながら、中小建設業にとって ICT 施工やデジタルデータ活用などのデジタル実装は容易ではなく、特に中小規模工事では追加的費用がかかることや成果が出る前に工事が終わる可能性が高いため、実践や導入に躊躇する傾向が強い。本稿が紹介した阿部建設、愛亀は積極的にデジタル実装を展開する企業であり、また、i-Construction に力を入れる中小建設業者も全国各地に存在するわけだが、しかしながら他方で、図 11 で指摘されているように、地域の地場建設業者で ICT 施工を経験した企業は受注企業全体の約半分であり、ICT 建機等の費用の高さに言及しているように採算性や投資問題がネックとなり、デジタル実装に踏み切れない企業も多いことが窺える。(i-Construction 推進における中小建設業への普及課題について、図 12 も合わせて参照されたい)。

自然災害の被災地域復旧事業は地場の中小建設業者が担うことが多い。国交省の現地復興事務所と地場建設業者が協働で、二次災害を防ぎながら早期復旧に尽力する。災害時のリスクの高い現場の施工技術として情報化施工を基軸に進歩を続ける遠隔操作による無人化施工、また本稿でも取り上げる自動化施工の実用化および研究開発が進んでおり、災害復旧に大きな成果を上げている(森下・増 [2021])。しかしながら、他方で中小建設業者によるこれら技術成果の導入・活用は、先述のように採算性等から見送られる傾向が強い。


例えば、次のケースを見てみよう。図 13 および図 14 は 2017 年九州北部豪雨の被害概要である。写真 8 は国土交通省九州地方整備局筑後川河川事務所の九州北部豪雨復興事務所と乙石川上流の被災直後を撮影したパネルである。写真 9 は 2021 年 12 月段階の朝倉市乙石川区における災害復旧現場の様子である。記録的な豪雨による山腹崩壊によって甚大な被害が発生した。被災現場は建機乗り入れができないほど地盤が緩く(写真 10 は建機を被災現場につり下げて搬入しているところ)、ぬかるんでおり復旧事業は難航した¹¹⁾。2017 年以後も例年の大雨により浸水被害等が連続的に発生している。復興事務所を中心に地場の建設業者による尽力で 2023 年 3 月 31 日の工期完了に向けて復旧が着実に進んでいるものの、施工に困難を伴う現場であるといつてよい。

当該復旧工事は国土交通省直轄工事であり、i-Construction 推進や建設 DX が強く意識されるものの、その実態は ICT 施工の実施が皆無の状況である。乙石川区は九州北部豪雨で最も被害が甚大であった現場であり、二次災害リスク回避やさらなる早期復旧に向けた生産性向上などを考えれば遠隔操作による無人化施工や自動化施工の実施が考えられるものの、地場の中小建設業ではデジタル実装された機械化施工は展開されていない。山間部であること、また通

信環境が整っていないことや大雨災害が続いているといった作業環境と、ICT 建機や各種機器のコストと採算性を考慮した複合要因により、ICT 施工やデジタル実装は難しいことが内実である。

無人化施工および自動化施工の現状は大規模なデジタル実装型機械化施工と違ってよく、先述の複合要因を内包し、また工期内完了が強く求められる復旧工事において中小建設業者が実証実験型オペレーション展開による試行錯誤や検証作業を実施する余力は持てないのが実態といえる。大手・準大手ゼネコンが大規模工事で無人化施工や自動化施工の先駆的実用化、また実証実験型オペレーションを実践しており、またレンタル業者大手によってそれらがレンタル商品化（例えば、写真 11 にあるように既存重機への後付け装置で無人化施工システムを構築できる）されている一方で、中小建設業者にとってハンドリングがしやすく、コスト的に導入容易性が高いシステムは多くない。

阿部建設や愛亀のケースに戻ろう。阿部建設 PJ および愛亀 PJ の開発志向性には、既成のデジタル機器を組み合わせることで導入コストを抑えようという意図がある。ICT 建機は高価であり、また、後付け装置にてデジタル実装しようにも旧モデル建機は非対応である場合も多く、i-Construction 推進や ICT 施工のトライアル的な実施は中小建設業者にとって投資負担が大きい。阿部建設・愛亀の両社による国交省 PRISM はデジタル実装を促進するための技術的・金銭的ハードルを下げる役割を果たすことがミッションでもあり、中小建設業者・中小



更なる生産性向上に向けて

2016年度～2020年度までの取り組み	2021年度の主な取り組み
<ul style="list-style-type: none"> ➢ ICTの活用拡大 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 土工、舗装工・浚渫工・i-Bridge(試行)、建築分野(官庁営繕)・河川浚渫等、地盤改良工、付帯構造物設置工、維持管理分野等へ導入するとともに、更なる普及拡大のため「簡易型ICT」の実施 ➢ 3次元データの収集・利活用 <ul style="list-style-type: none"> ✓ i-Constructionモデル事務所の指定 ✓ 2023年までの小規模を除く全ての公共工事におけるBIM/CIM原則適用に向け、現場、研究所、企業、大学との連携強化 ✓ 国土交通データプラットフォームの公開及び連携データの拡充 ➢ 新技術の開発・導入 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 2020年度より直轄工事において新技術の活用を原則義務化 ✓ 建設現場のデータのリアルタイムな取得・活用などを実施するモデルプロジェクトの実施 ➢ 普及・促進施策の充実 <ul style="list-style-type: none"> ✓ (i-Construction大賞(大臣表彰制度)に地方公共団体部門やベンチャーの優れた取組を表彰 ✓ 地方自治体発注工事等へのICT活用拡大を図るアドバイザー制度等のサポート体制の充実 ✓ 生産性向上に資する取組を実施した工事を工事成績評価において優位に評価する生産性チャレンジ工事の実施 ➢ 施工時期等の平準化 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 国庫債務負担行為の拡大 ✓ 「地域平準化率」の見える化 等 ➢ 全体最適の導入(コックピットの規格の標準化等) <ul style="list-style-type: none"> ✓ 特殊車両により運搬可能な規格についてプレキャスト工法の原則採用 	<ol style="list-style-type: none"> 1 中小企業等のICT施工利活用環境の充実 <ol style="list-style-type: none"> ①ICT建設機械の導入支援に向けた認定制度創設 ②作業員の負荷軽減に向けたパワーアシストスーツ等の試行 ③ICT施工未経験企業へのアドバイスをを行う取組の全国展開 ④ICT活用工事の標準化を見据えた地元企業への発注者指定型方式の拡大 ⑤入札時に生産性向上の取組を評価する取組の試行 ⑥施工、管理から納品の一連のプロセスのオンライン化による現場確認の効率化や品質向上の促進 ⑦構造物の出来形管理や路盤工へのICT活用拡大 2 生産性向上のための工法、材料等の導入拡大 <ol style="list-style-type: none"> ①Value For Moneyの試行によるプレキャスト活用拡大 ②現場打ちコンクリートの品質確認の効率化のためのJIS規格の改訂 ③ロボットやAI活用等による交通誘導員の人手不足解消 ④定置式ルン等を活用した現場内運搬の省力化を促進 3i-Constructionの海外展開 <ol style="list-style-type: none"> ①先進諸国の制度設計やISO等を踏まえた国内基準類の国際標準化を推進 ②海外技術者向けのi-Construction研修を本邦研修に設置するための研修内容作成 ③東南アジアを対象としたICT施工の展開に向け、官民連携し課題分析や展開戦略を整理

出所) 国土交通省大臣官房技術調査課 [2021 b] より借用。

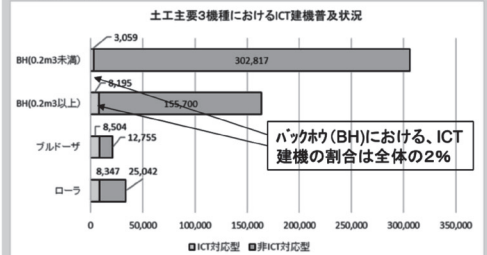
図 10 2021 年度における生産性向上の主な取り組み

1 ① ICT建設機械の導入支援に向けた認定制度創設



- ICT施工の中小企業等への普及拡大に向け、従来の建設機械に後付けて装着する機器を含め、必要な機能等を有する建設機械を認定し、その活用を支援
- 令和3年度には、認定スキームの構築や、制度運用体制の整理を行い、4年度以降の運用開始を目指す

- 地域を地盤とするC,D等級の企業において、ICT施工を経験した企業は、受注企業全体の約半分にどまっており、こうした企業への普及拡大が必要
- 業団体からは、ICT建設機械の費用が高い、ICT機器を工事着手前から工事終了まで全期間に渡って確保する必要があるため費用が合わない(一度手放すと機械の確保ができない)といった、意見が寄せられている
- ICT建設機械のシェアは低く、普及には認定制度などを活用した支援が必要



出所) 国土交通省大臣官房技術調査課〔2021 b〕より借用。

図 11 中小建設業への ICT 施工支援の例

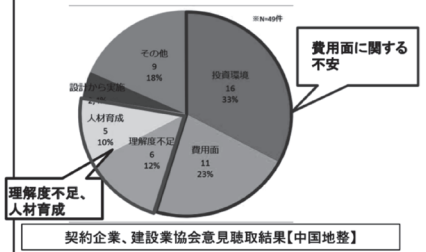
ICT施工の普及拡大に向けた課題と対応策



- ICT施工の普及拡大に対しては、費用面への不安、役員・職員の理解度不足等が課題。
- 積算基準の見直しや簡易型ICT活用工事等費用面への対応、経営者向け講習会の実施、更に一部地域では、業界主体でICT施工未経験企業へのアドバイスをを行う取組等を推進。

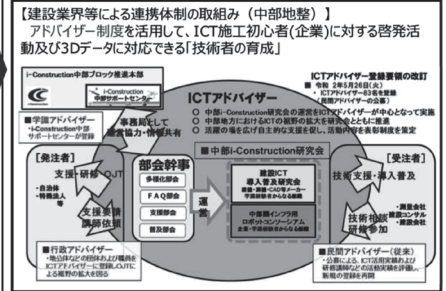
■ICT施工の普及拡大への課題

- ICT施工を中小企業に普及させるための課題は費用面に関する不安感がある。
 - >投資環境 「ICT建機」や「測定機器」が高額なため、中小規模工事での導入コストの投資に見合わないことや、工事での採算性に不安がある。
 - >費用面 ICT施工に必要な機材の初期コストや建設機械が高い。
 - >ICT施工への理解度不足や人材育成 企業役員・職員の理解不足 企業職員に3次元に係る人材がいない。



■ICT施工の普及拡大への取組

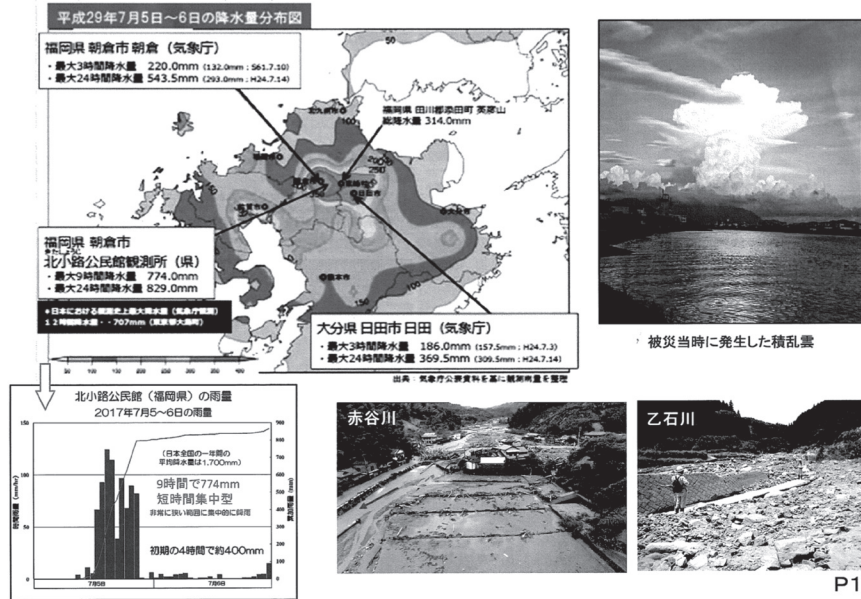
- 費用面に対する取組み
 - ・積算基準の見直し(間接費に3D成形管理費用を計上)
 - ・簡易型ICTの活用 (ICT建機を使わなくICT活用工事として費用計上)
 - ・3D測量や設計などICT施工に関するサポート費用の計上 (中国 Light ICT「ICT専任講師制度(中国地整)」)
- 投資環境・ICT施工への理解・人材育成に対する取組み
 - ・中小規模工事でも採算がとれるよう、工事受注者へアドバイス
 - ・経営者向けの講習会の実施
 - ・各地整での講習会の実施(施工者・発注者向け)



出所) 国土交通省〔2020〕より借用。

図 12 ICT 施工普及課題の現状

平成29年7月九州北部豪雨の被害の概要



出所) 国土交通省九州地方整備局筑後川河川事務所九州北部豪雨復興事務所提供の資料より借用。

図13 九州北部豪雨の被害概要①

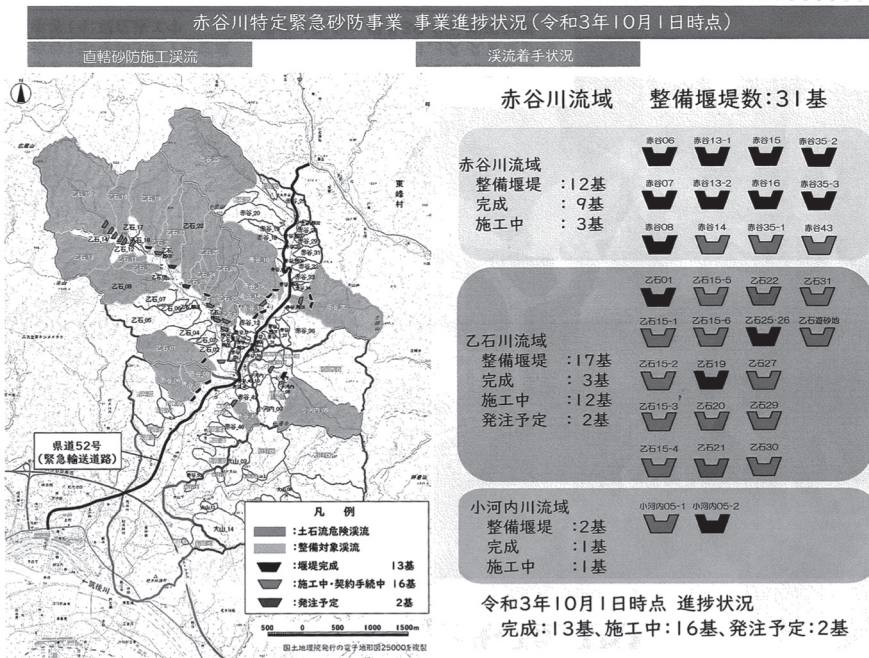


図14 九州北部豪雨の被害概要②

復興事務所



出所) 筆者撮影：2021年12月（福岡県朝倉市）

乙石川上流の被災状況パネル



写真8 九州北部豪雨復興事務所との乙石川被災状況のパネル



出所) 筆者撮影：2021年12月（福岡県朝倉市，協力：九州北部豪雨復興事務所）

写真9 地場建設業者による復旧工事の現場（福岡県朝倉市乙石川）

規模工事での生産性向上を支援するボトムアップ型の技術開発成果創出へのチャレンジだと位置づけることができる。阿部建設PJおよび愛亀PJはともに特殊な作業環境ではない現場の取り組みであるが、これらデジタル実装のヒューリスティックな方法から蓄積される経験値は中小建設業者の災害復旧工事でのITC施工普及拡大に活用することができる。

大手・準大手ゼネコンのデジタル実装型機械化施工開発の到達点とは違うフェーズから中小



出所) 九州北部豪雨復興事務所提供の資料より借用。

注) 写真の一部に図形追記の筆者加工。

写真10 2017年九州北部豪雨被災現場への建機搬入風景

遠隔操作室

ICT後付け装置を実装した重機



出所) 筆者撮影：2021年8月（大阪府大阪市，協力：西尾レントオール）

写真11 無人化施工のレンタルシステム商品

建設業者によるボトムアップ型技術開発が各地で展開されることで、建設プロセス革新を多角的な視座から検討することが可能となる。本稿による建設生産システム高度化へのインプリケーションに向けて、当該ケースから描き出せるキーポイントは「ボトムアップ型技術開発」である。

3. 自動化施工の実用化とスピルオーバー：鹿島建設の A⁴CSEL

3.1 自律施工技術のシステム化

大手・準大手ゼネコンを中心に自動化施工が進歩し続けている。本稿のいう自動化施工とは、自動走行と自動作業の組み合わせによる「建機の自動運転」を基軸にシステム化された自律施工技術の総称を意味する。自律施工技術はオペレータが建機と 1 対 1 で遠隔操作する無人化施工技術とは異なり、必要最小限の人員または究極的には 1 名で複数台を動かすことができる、また建機が自分で状況判断し作業を進める建設生産技術である (岩見 [2021])。建設業の自動化施工の実用化は作業環境・条件の非定常性が大きな制約条件になっているが、デジタル技術の進歩がそのハードルを下げている。デジタル実装をテコに開発および高度化が進む自動化施工は、「現場の工場化」の文脈で高効率生産システム、またシステム最適化を旗印に機械施工化・自動化の技術開発が続けられており大きな成果を上げているが、それは特定のヒト作業を機械作業化し、代替する方向性で発展してきたとあってよい。先述の MC も自動機械作業技術であり、デジタル技術の進歩のもとで特定の作業を実行する建設ロボットである Single-Task Construciton Robots (以下、STCRs) の開発が、昨今の自動化施工、建設現場の工場化の基礎をなしている (Bock & Linner [2016])。この基礎の上で自動化施工にとって重要となるのが高度な判断の機械化と複数の建機をシステム化し、制御する技術を確立することにある。

本邦建設業の STCRs にみる繰り返し反復作業の自動化は世界的に高水準にある。自動化施工の目指すべき姿として設定されているのが、STCRs を含め、複数の機械による自律分散型の建設生産システム実現であるといつてよい (善本 [2022])。システムとしての自動化施工を捉える昨今において、STCRs 開発はサブシステム、つまりモジュール開発に位置づけられることになる。

自律施工技術のシステム化の先駆的なケースは、鹿島建設株式会社 (以下、鹿島建設) の A⁴CSEL (クアッドアクセル) である。同システムは自動運転機能を有した複数の建機による自動化施工であり、すでに実用化され、世界初の施工として現場運用されている¹²⁾。最も世界で進んだ最先端施工のありようを以下では概観していく。

3.2 鹿島建設の A⁴CSEL

鹿島建設の A⁴CSEL は、動運転機能を有した自律制御型自動建機と人が分担作業をする次世代施工システムとして開発されてきている (三浦 [2017])。先述したように無人化施工と違い、事前に施工条件をプログラム入力し、決められた手順で複数の建機を自動運転化することで自

律施工技術をシステム化するものである。図 15 は A⁴CSEL の開発コンセプトを示している。

他方で、同施工システムがすべての作業を機械化するものかといえば、それは違う。A⁴CSEL のターゲットは「製造業における産業ロボットや CNC 加工機のように、多様の作業が可能な自動化機械を用い、それらを制御信号にて自在に動作させるシステムを築くことによって建設作業の自動化率、機械化率を上げる。その結果、真に熟練の技が必要なものだけを人が担当し、それ以外は自動機械が分担する施工システムを実現することで、『現場の工場化』につなげたい¹³⁾とされる。複数の STCRs や建機による定型作業・繰り返し作業の自動運転はすでに実現しており、これらを A⁴CSEL の立脚基盤とする一方で、同社は重要な論点を持続的なシステム開発としている（三浦 [2021 a]）¹⁴⁾。つまり、鹿島建設はマン・マシンのありようを常に更新することで、建設の QCTS パフォーマンス向上を継続的に追求する生産システムの確立を A⁴CSEL で目指しているといつてよい。

A⁴CSEL の具体的な稼働現場としては、秋田県の成瀬ダム堤体打設工事（以下、成瀬ダム工事）、奈良県の赤谷 3 号砂防堰堤工事（以下、赤谷砂防工事）がある¹⁵⁾。成瀬ダム工事は 2020 年 7 月から自動化施工をスタートした。写真 12 は成瀬ダム工事での A⁴CSEL 稼働の様子である。図 15 の開発コンセプトは 1 名で複数の自動運転を担当するが、「現実的には、現場内のすべての作業を自動で行うことは困難であり、人力による作業等との連携や、進捗のバラツキで生ずる作業間、機械間の調整などが必要であり、『一人がタブレットで指示する』ことは難しい¹⁶⁾」のが 2021 年の現状であり、写真 12 の管制室、また、図 16 のように管制室・コックピット型の仕組みで運用されている。

赤谷砂防工事も同様に管制室・コックピット型の A⁴CSEL となっている。以下、当該工事についてみていこう。図 17 は奈良県五條市にある赤谷地区現場の位置図である。この現場は 2011 年の 9 月の台風 12 号の豪雨による紀伊半島大水害の河道閉塞（天然ダム）のうち、大規模な 5 箇所内の一つである¹⁷⁾。天然ダムは図 18 のように 17 箇所が発生しており、赤谷地区は改正土砂災害防止法に基づく緊急調査対象であった。

図 19 は赤谷砂防工事の概要である。天然ダムの安定化が工事目的であり、崩壊斜面に最も近接した箇所での施工で二次災害を避けるべく、2020 年 2 月から自動化施工と無人化施工を組み合わせた堰堤構築がスタートした。自動化施工と無人化施工の概要を示したのが写真 13 である。ダンプトラックによる運搬は遠隔操作で行われ、敷均し・転圧は自動走行および自動作業の建機で実施された。写真 14 は赤谷砂防工事の様子である。写真右側は A⁴CSEL で自動運転化された建機群である。写真 15 は写真 14 とは反対側より撮影された、より工事が進んだ時点の現場の様子である。

赤谷砂防工事では 3 号砂防堰堤より以前の施工で無人化施工はすでに導入されていた。3 号砂防堰堤より自動化施工が実施されることになった。赤谷砂防工事では新しい自動運転の建機

が開発・実用化された。その作業は写真 13 で言及されているコンクリートブロック設置であり、図 20 がその自動化施工の概要である。写真 16 は自動化施工仕様に改造され、運用された建機によるデモの様子である。コンクリートブロックの AR マーカーをカメラで読み取り 3D 座標を確認し、自動で把持して積み上げていく。遠隔で操作されるダンプトラックによっ



出所) 三浦 [2021 a], 123 ページより借用。

写真 12 成瀬ダム工事での A* CSEL の様子

自動化・無人化施工の概要



出所) 鹿島建設赤谷工事事務所提供の資料より借用。

写真 13 自動化施工と無人化施工の概要

て運ばれてきたコンクリートブロックを自動運転バックホウが自動設置していくわけである。当該コンクリートブロックも新たに独自開発された資材である。この自動運転バックホウと資材の両方の新規開発と実装は、発注者である国土交通省紀伊山系砂防事務所との協働の中で実施された。



出所) 筆者撮影：2021年9月（奈良県五條市，協力：鹿島建設）

写真14 赤谷砂防工事の現場とA⁴CSEL



出所) 国土交通省近畿地方整備局紀伊山系砂防事務所ホームページ
： <https://www.kkr.mlit.go.jp/kiisankei/map/3.html> より借用（2022年2月20日アクセス）

写真15 2022年1月28日時点での赤谷3号砂防堰堤の様子



出所) 筆者撮影: 2021年9月(奈良県五條市, 協力: 鹿島建設)

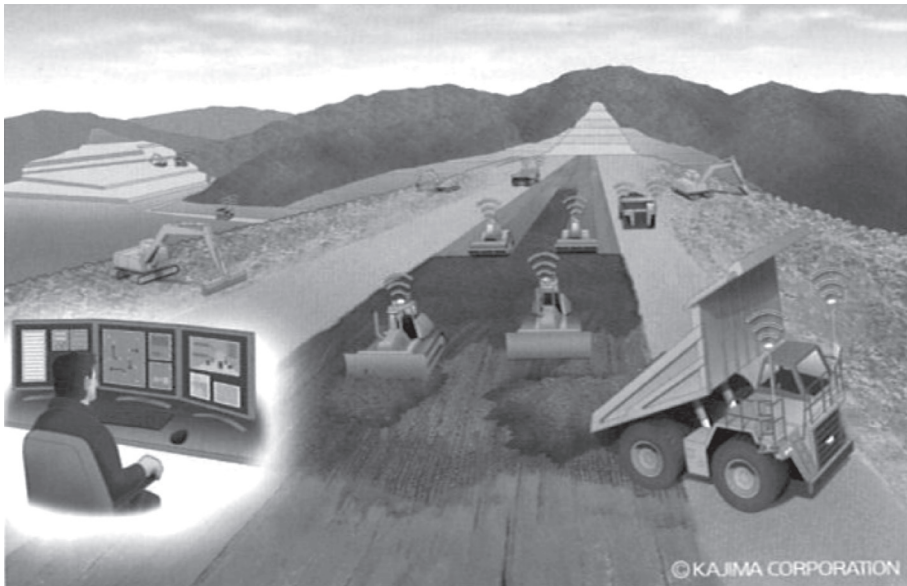
写真16 自動化施工仕様のバックホウによるデモ

作業員1名がタブレットから複数の自動運転建機にデータ伝送



出所) 三浦 [2021 a], 120 ページより借用。

図15 鹿島建設 A'GSEL の開発コンセプト



出所) 三浦〔2021 a〕, 123 ページより借用。

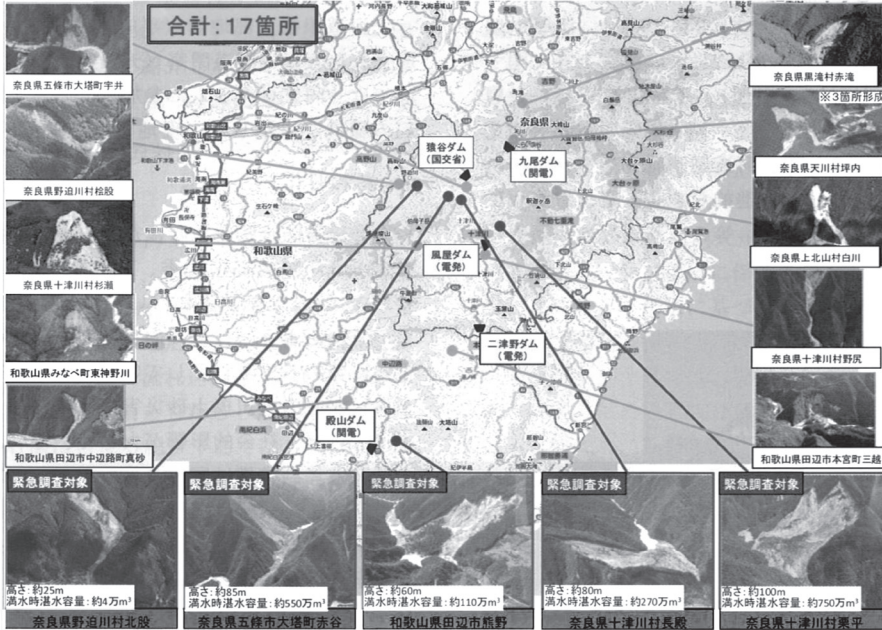
図 16 管制室・コックピット型による A⁴CSEL 適用イメージ（ダム工事）

赤谷地区（五條市大塔町清水）位置図 国土交通省 鹿島
紀伊山系砂防事務所



出所) 鹿島建設赤谷工事事務所提供の資料より借用。

図 17 赤谷砂防工事の位置（奈良県五條市）



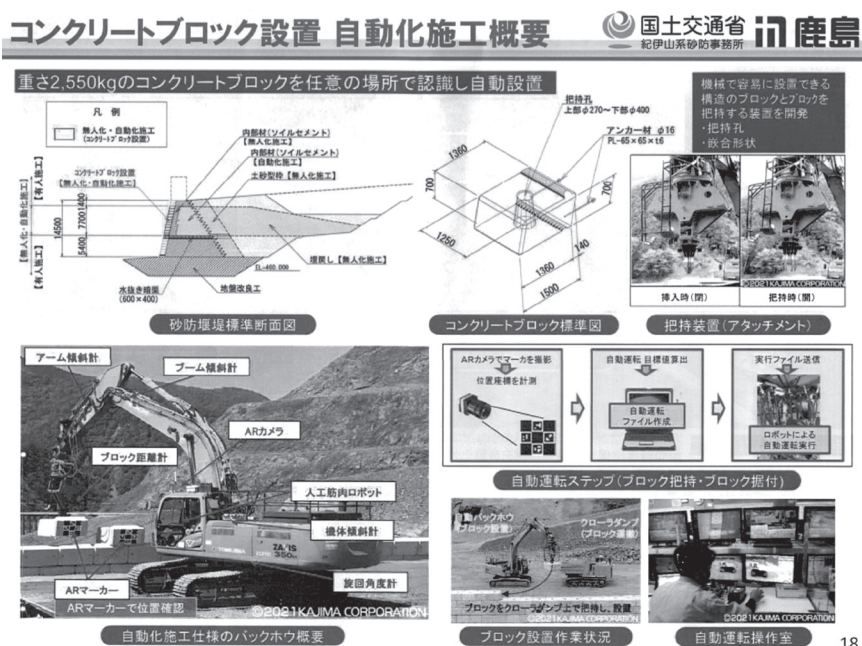
出所) 水野他 [2021], 8 ページより借用。
 注) 河道閉塞 (天然ダム) 発生 の 17 箇所は 2011 年 9 月 13 日に確認されている。国土交通省水管理・保全局砂防部 [2011] を参照。

図 18 紀伊半島大水害での河道閉塞 (天然ダム) 発生箇所



出所) 鹿島建設赤谷工事事務所提供の資料より借用。

図 19 赤谷砂防工事の概要



出所) 鹿島建設赤谷工事事務所提供の資料より借用。

図 20 自動化施工によるコンクリートブロックの設置

3.3 システム化技術のスピルオーバーへの期待

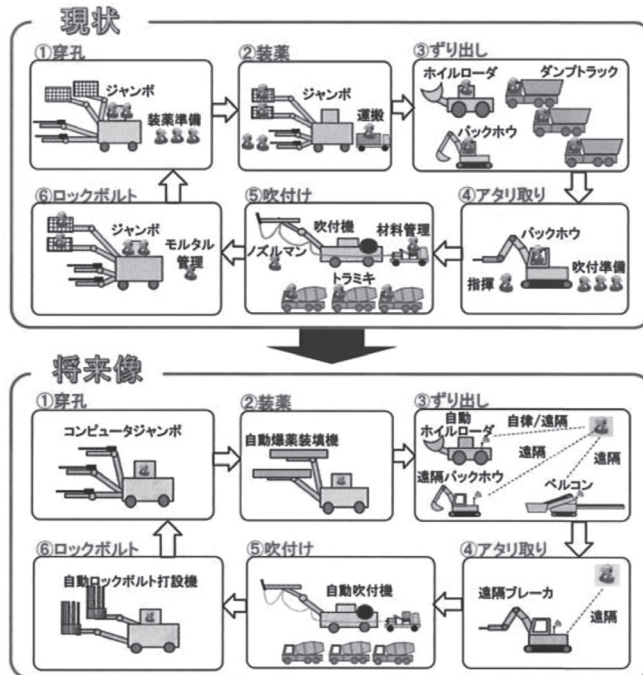
鹿島建設はA⁴CSELの高度化と多様な工事での適用・導入を加速させている。例えば、山岳トンネル掘削の自動化施工の開発を進めている（三浦他〔2020〕、真下〔2021〕）。図21は同社が描くトンネル自動化施工の将来像である。ダム、砂防でのA⁴CSELと同じ考え方で、トンネル工事の「現場の工場化」が目指されている。また、図22は「遠隔集中管制システム」の概要を示したものである。「遠隔集中管制システム」の実証実験はA⁴CSELを導入している3箇所（成瀬ダム工事現場、赤谷砂防工事現場、鹿島建設西湖実験フィールドの2つの建設サイトと1つの実験場）を東京本社ビルで一括管制し、4名の管制員で同時に複数箇所の自動運転の管制と遠隔操作による作業を行った（鹿島建設〔2021〕）。

以上のように、自律施工技術の普及拡大とさらなるシステム化を目指し、先行投資と技術開発を進める鹿島建設は、自社ビジネスのみならず、本邦建設業の自動化施工の機運を高めることに貢献することを意図している（三浦〔2021 b〕）。しかしながら他方で、「建設業界ではクアドラックスを『積極的に使おう』『導入しやすい仕組みをつくろう』といった動きにはなっていません。発注者など社外からも評価されていますが、珍しさに対する注目という意味合いが強い」傾向にある。続けて、「導入を進めて日本の構造改革につなげたいという我々の認識とは温度差があります」¹⁸⁾と鹿島建設はみている。

自動化施工の現場導入・実用化は A⁴CSEL が先行しているわけだが、他の大手ゼネコンや建機メーカーもその研究開発を加速させている。例えば、株式会社大林組（以下、大林組）の OTISM (Obayashi Tunnel Integrated System), 大成建設株式会社（以下、大成建設）の T-iCraft (Taisei ICT Construction Robot Automatic Fit Team), 株式会社小松製作所（以下、コマツ）の SMART CONSTRUCTION (スマートコンストラクション), 日立建機株式会社の自律型建設機械向けシステムプラットフォームである ZCORE などのコンセプトや研究開発がある¹⁹⁾。

ICT 建機や STCRs・建設ロボット、多様な後付け装置など自動化施工の要素技術、モジュール（サブシステム）開発が進み、その多くがすでに実用化されているため、自社保有およびレンタルのどちらでも導入することが可能である。他方で、System of Systems のコアとなるシステム化技術についてはゼネコンであるか建機メーカーであるかを問わず、競争領域としての様相を示している。

自動化施工普及・実用化の時機到来とみている鹿島建設は、「これからは自動化施工が当たり前になるはずです。重機メーカーには、誰もが使いやすい統一規格のインターフェースを搭載した自動化重機を開発してほしい。そのうえで、建設会社はソフト部分、つまり施工方法で競争する」²⁰⁾と述べる。同質的競争と差別化競争の繰返しが産業の競争力を高めていく（橘川 [2000], 宇田川・新宅 [2000]）。建設業界として自律施工技術の普及拡大に向かう潮流が強まれば



出所) 三浦他 [2020], 97 ページより借用。

図 21 鹿島建設による山岳トンネル自動化施工の将来像

ば、競争を通じて自動化施工実現のシステム化技術が進歩し、そこから汎用的技術や協調領域などが生まれることで、技術が多方面にスピールオーバーしていくことが期待される。本稿による建設生産システム高度化へのインプリケーションに向けて、当該ケースから描き出せるキーポイントは「スピールオーバー効果」である。



出所) 鹿島建設〔2021〕から借用。

注) 図中の囲み【説明文】は筆者追記。

図 22 鹿島建設の遠隔集中管制システムの実証実験

4. スタートアップによる問題提起：Polyuse の建設 3D プリンタ

4.1 建設 3D プリンティング

建設業で 3D プリンティングの活用が進んでいる。写真 17 はオランダ企業で金属 3D プリンティング事業を展開する MX3D の生産拠点と、その入居先であるオランダ・アムステルダムの運河北部にある NDSM (The Nederlandsche Dok en Scheepsbouw Maatschappij) の外観である²¹⁾。同社は ABB 社 (イタリア) の 6 軸ロボットアームを使い、WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing) で世界初の金属製の橋を造形生産した企業である (Gardner et al. [2020])²²⁾。

NDSM の拠点で生産された橋は、実際にアムステルダム内の運河に設置された (写真 18)。製造業をはじめ多くの分野で一般化しつつある AM (Additive Manufacturing) ベースの技術導入そのものが建設業における大きな挑戦となっている (Laghi et al. [2020])。

図 23 で示されているように世界的に建設 3D プリンティングの活用が加速しており、日本国内でも海外に比して遅れながらも建設 3D プリンタ開発および実用化の動きが活発化してきている (日経 BP [2020])。本邦建設業において、コンクリート工の生産性向上は i-Construction の大きなターゲットであり、現場でのコンクリート打設をプレキャストコンクリート部材 (以下、プレキャスト) 活用に切り替えていく工法が推進されている (図 24)²³)。プレキャスト活用と同時にコンクリート工の課題解決に向けた有力なデジタル実装として期待を寄せられているのが、建設 3D プリンティングである。写真 19 のようにセメント系材料の 3D プリンティングは造形の自由度を提供し、金型・型枠を不要とするデジタル技術の一つである。こうしたコンクリートの 3D プリンティングを「デジタルコンクリート (Digital Concrete)」と呼称し、その社会的インパクトや経済効果を評価する動きも出ている (Perrot & Rangeard [2019])。

本邦のコンクリートの 3D プリンティングは省力化や工期短縮の技術として期待され、研究開発が進んでいる (坂上他 [2020])。例えば、大林組はロボットアーム式 ([坂上他 [2018], 坂上他 [2020]) を、大成建設はガントリー式 (木ノ村 [2020]) のシステム開発を進めるなど、大手ゼネコンによる先駆的な展開が加速している (写真 20)。また、主たる建設 3D プリンティング技術であるロボットアーム式およびガントリー式とは異なるシステムとして、ICT 建機 (MC 機能) を使用する On-Site Shot Printer と呼ばれるコンクリート 3D プリンタの開発も進んでいる (羽生他 [2020])。On-Site Shot Printer は新たに開発された乾式吹付けと湿式吹付けの両技術を融合したハイブリッド型材料吹付けシステムを建機に取り付け、造形する仕組みである (写真 21)。建設材料の企業もコンクリート 3D プリンタの研究開発・実用化に取り組んでいる。写真 22 は會澤高圧コンクリート株式会社 (以下、會澤高圧コンクリート) のロボットアームを使ったコンクリート 3D プリンタである。同社は 2018 年のロボットアーム導入から研究開発を進め、速硬性特殊セメント系材料、3D データ、6 軸ロボットアークで構成される 3D プリンティング技術の確立を進めている (東 [2021])。

先述した大林組や大成建設、會澤高圧コンクリートの取り組みは、単独ではなく他社との協働で実施されている。大林組と大成建設はともに材料メーカーと、會澤高圧コンクリートは Cybe Construction の 3D プリンタを導入し、研究開発を展開している²⁴)。會澤高圧コンクリートが導入した 3D プリンタを手がける Cybe Construction は 2014 年設立のオランダのスタートアップ企業である。

海外に比して、日本国内の建設 3D プリンティングの技術開発は出遅れているといわれている (日経 BP [2019], 羽生他 [2020])。日本国内では大手ゼネコンが先導しているが、大林組や

MX3Dの生産拠点 (橋の金属 3Dプリンティング)



MX3Dが入居するNDSM (オランダ, アムステルダム)



出所) 筆者撮影 : 2018年2月 (オランダ・アムステルダム)

写真17 MX3Dの拠点とNDSMの外観



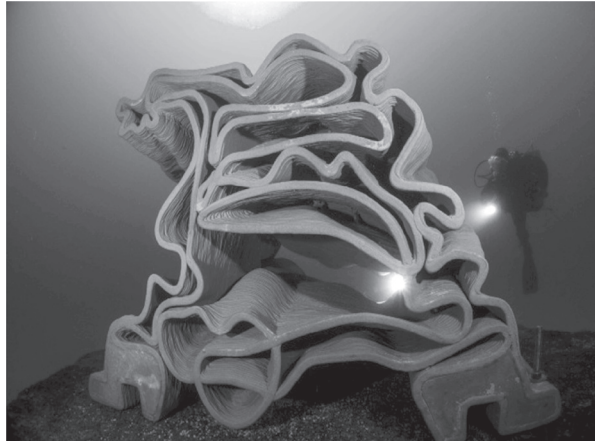
出所) MX3DのHPより借用。

(<https://mx3d.com/industries/infrastructure/mx3d-bridge/> : 2022年1月31日)

写真18 MX3Dによる3Dプリンティングの橋

能の問題から克服すべき制約条件のハードルの高さが開発の障壁になっている²⁵⁾。

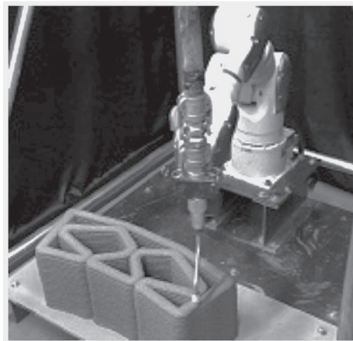
海外のスタートアップ企業がコンクリート 3D プリンティング開発で先行する中、日本国内でも事業化にチャレンジするスタートアップが 2019 年から活動しはじめている。以下では、このスタートアップに目を向けてみたい。



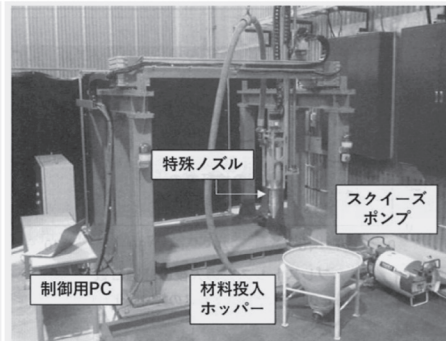
出所) Perrot & Rangeard [2019], p.126 より借用。

写真 19 3D プリンタで造形した複雑な構造物

大林組の3Dプリンタ
(ロボットアーム式)



大成建設の3Dプリンタ
(ガントリー式)



出所) 坂上他 [2018], 1 ページより借用。 出所) 木ノ村 [2020], 53 ページより借用。

写真 20 大手ゼネコンのコンクリート 3D プリンタ

鉛直吹き
(バケットにノズルを鉛直方向に取り付け)

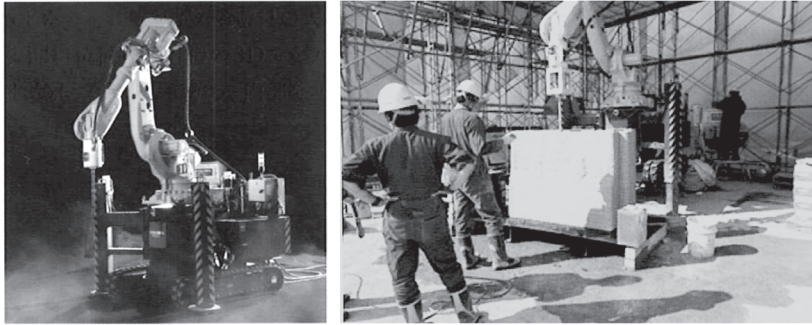


水平吹き
(バケットにノズルを水平方向に取り付け)



出所) 羽生他 [2020], 49 および 50 ページより借用。

写真 21 On-Site Shot Printer



出所) 東 [2021], 152 および 153 ページより借用。

写真 22 会澤高圧コンクリートの 3D プリンタ

4.2 Polyuse

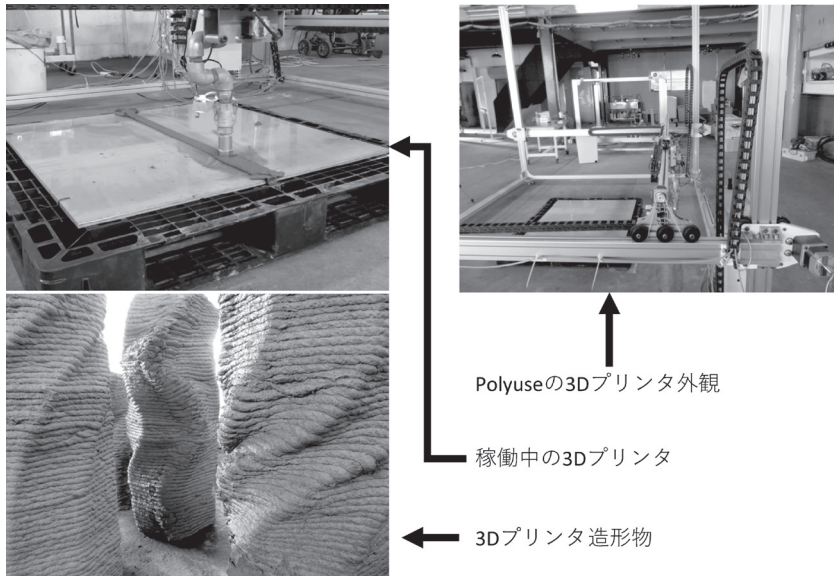
Polyuse は 2019 年設立の建設スタートアップ企業である。本社を東京に構え、建設 3D プリンターの開発および事業化に取り組んでいる。同社の建設 3D プリンタはコンクリート材を積層成型するマシンである。持ち運びと現場設置の容易性を持たせ、どのような現場でも活用することが可能となる汎用性確保と小型化をターゲットに、3D プリンタにコンクリート材を供給するミキサー、ポンプも開発している。写真 23 は Polyuse 製の建設 3D プリンタとその造形サンプル、写真 24 は筆者が参加した造形実験のサンプル断面である。写真 23 のとおり開発マシンは門型のガントリー式であり、また現場で組み立てるキット方式となっている。同社は京都を地場に事業展開する吉村建設工業株式会社 (以下、吉村建設工業) との協働のもと、システムの自社開発・自社生産を貫いている。

吉村建設工業が開発資金の提供をはじめ、「小型で持ち運べる 3D プリンターの開発を提案…ポリウスが施策した 3D プリンターで集水升を製作し、実際に埋設する実証実験」²⁶⁾ を行うなど、Polyuse は中小建設業者と協働で研究開発や施工での検証を進めている。また、吉村建設工業の他、前田建設工業株式会社 (以下、前田建設工業) とも協働で集水升の造形に取り組むなど、同社は多様な建設業者との連携に積極的である²⁷⁾。

同社は雑誌記事にて「分解した建設 3D プリンターの機材は車に納まるサイズだ。持ち運びから組み立て、撤収まで現場の建設従事者だけでもできるようにしたい」²⁸⁾ との狙いを述べている。Polyuse のコンセプトは「建設業界をテクノロジーの力でアップデートする」²⁹⁾ ことである。吉村建設工業、前田建設工業との連携は Polyuse にとって施工のありようを学ぶ機会となっている。

Polyuse の事業は現場ニーズをもとにした課題解決型技術の実用化である。Polyuse は先述したように現場への搬入と組立の容易性を考え、軽量・小型のシステム化とするため門型のノズル方式にこだわっている³⁰⁾。その背景には、協働先のニーズと提案があった。プレキャス

ト活用が推奨、推進されているが、しかしながら、吉村建設工業は「施工ヤードが狭い現場、部材の設計や搬入に制約がある現場などで、『その場で部材を造る方が合理的だと感じるものがよくあった』³¹⁾」として、先述のようにPolyuseに小型3Dプリンタ開発を提案したわけである。この吉村建設工業の談にあるように、プレキャスト使用の制約条件が強い現場では、プレキャストが非合理的な場合も出てくる。Polyuseは吉村建設工業との取り組みから開発する



出所) 筆者撮影：2021年11月（神奈川県鎌倉市，協力：Polyuse）

写真 23 Polyuse の建設 3D プリンタ（鎌倉市の開発拠点）

断面を撮影したサンプル

横から撮影したサンプル

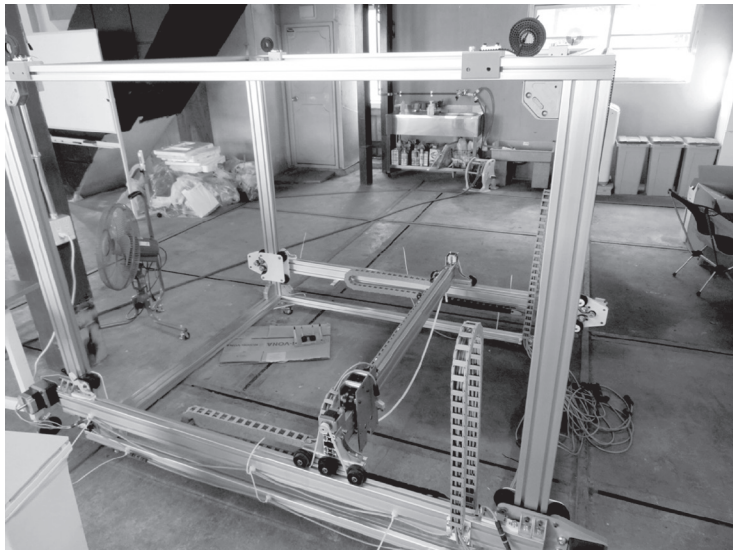


出所) 筆者撮影：2022年2月（京都府京都市）

写真 24 Polyuse から提供を受けた 3D プリンタ造形物の断面

プリンターについて、「土木工事で使うプレキャスト部材を 3D プリンターで製作して置き換える」³²⁾ とのあるべき姿を描き出した。海外の建設 3D プリントングで産業用ロボットアームを使用するシステムが多勢を占める中で、Polyuse の出した一つ的设计解が写真 23 の門型のガントリー式 3D プリンタであった。写真 25 はより小型化された同社 3D プリンタである (写真 23 の 3D プリンタと比較して)。

物理的空間制約等によりデジタル実装や新工法の恩恵が得にくい現場では、建設プロセス革新の波に乗り遅れることになる。建設 3D プリントング技術を小型化・キット方式でシステム化する Polyuse の取り組みは中小建設業者による生産性向上支援のツール開発と位置づけることも可能である。



出所) 筆者撮影：2021年11月 (神奈川県鎌倉市，協力：Polyuse)

写真 25 ダウンサイジングした Polyuse の 3D プリンタ

4.3 スタートアップによる問題提起型事業

本稿は Polyuse の展開を問題提起型の事業として位置づけ、建設プロセス革新の論点から考察を加えてみたい。建設プロセス革新の文脈で、先述のように i-Construction においてプレキャスト活用がターゲットの一つになっている。その活用に積極的な姿勢を見せる中小建設業者も存在する。例えば、国土交通省関東地方整備局 i-Construction 推進本部の ICT アドバイザー認定を受けるなど、ICT 施工の多くの実績と経験、ノウハウを持ち、新たな技術や工法の採用に能動的な中小建設業者である山梨県南アルプス市を地盤とする湯澤工業株式会社 (以下、湯澤工業) を取り上げてみよう。写真 26 は同社の河川護岸工事現場とプレキャスト保管場所 (同現場内) である。大手・準大手ゼネコンのみならず、湯澤工業のように i-Construction

の推進やプレキャスト活用を实践する中小建設業者が存在する一方で、先述の吉村建設工業が言及しているように、プレキャストを活用しようにも制約条件に直面する現場ではそれが難しい、あるいは非効率である場合も出てくる。例えば山間部や中心市街地の狭隘な現場では、プレキャストの置き場が確保できないなど、である。

プレキャストには他にも大きな課題がある。現場打設からプレキャストへの移行は製造業が内製から外製へとモジュールの生産を転換する発想に近いといえるわけだが、一つの論点が建設資材のサプライチェーンとして、必要な時に、必要なだけ、JIT (Just in Time) で調達することが可能かどうか、である。段取り通りに資材が到着しない、個数が足りない、予定した進捗がずれるなどが発生すると施工は中断、遅れることになる。つまり、プレキャスト化はサプライチェーンのありようと供給先の安定供給力が現場の効率を左右する新たな要因となる。既出の図 24 はコンクリート生産性向上検討協議会が 2016 年 3 月から 2021 年 2 月までの主な議論を整理した資料からの抜粋である。ここでクラウド化と情報の一元管理が提起されているようにコンクリート工の生産性向上ではプレキャスト化と同時にサプライチェーンの効率化が大きな課題となっている³³⁾。図 25 でサプライチェーンマネジメントに関する課題と見直しの方向性として言及されているように、プレキャスト化において特注生産（一品受注生産）にみる発注側納期待ち問題（待ち時間ロス）と受注側在庫問題（デッドストックのリスク）の双方を同時解決する取り組みが不可欠であり、その簡単な仕組み概要が図 24 でクラウド化として提示されている。

建設業では施工の段取りが極めて重要になる。しかしながら、他方で段取り通りに施工が進まないケースは多い。変動要素が強い環境下での作業であり、想定外の事態が常態的に発生する。そのためサプライチェーンの効率化により予定された日程かつ必要量のプレキャストが届く段取りを整えたとしても、問題発生によって施工の中断、遅れによりコンクリート工の予定変更が生じれば、プレキャストを使用までどこかに保管しなければならないが、上述したような山間部や中心市街地の狭隘な現場の場合、その置き場が確保できないなどの新たな問題が発生する。こうした現場の生産性向上にはプレキャスト使用ではなく、現場打設の効率化・合理化が必要になる。

プレキャスト化は中小建設業や中小規模工事のコンクリート工の生産性向上を考えるにあたって、改めて克服すべき課題を考える契機になったといえる。上述のサプライチェーンの効率化ではカバーできない保管場の問題も、その一例である。

現場打設の新たな効率化・合理化手段も従来工法に比して割高となるコスト問題がネックとなり普及が進まない状況にある（矢作 [2018]）。湯澤工業のように先駆的な動きをみせる企業もあるが、プレキャスト化も新たな現場打設の効率化・合理化も多くの中小建設業のありようからすれば、強い制約条件が目の前に横たわっていると見てよい。

Polyuse の展開を振り返ろう。i-Construction 推進の大きな潮流でみると、そこからこぼれ落ちがちな現場ニーズを新たな機械施工技術によって満たすことが Polyuse のスタート地点であった。同社が搬送と組立の容易性を考え、小型化したのは現場ニーズへの対応であった。Polyuse は大型構造物に焦点を当てる 3D プリンティング技術開発の方向性と中小建設業者・中小規模工事の現場ニーズとの狭間にビジネスチャンスを見出したといえる³⁴⁾。

護岸工事現場

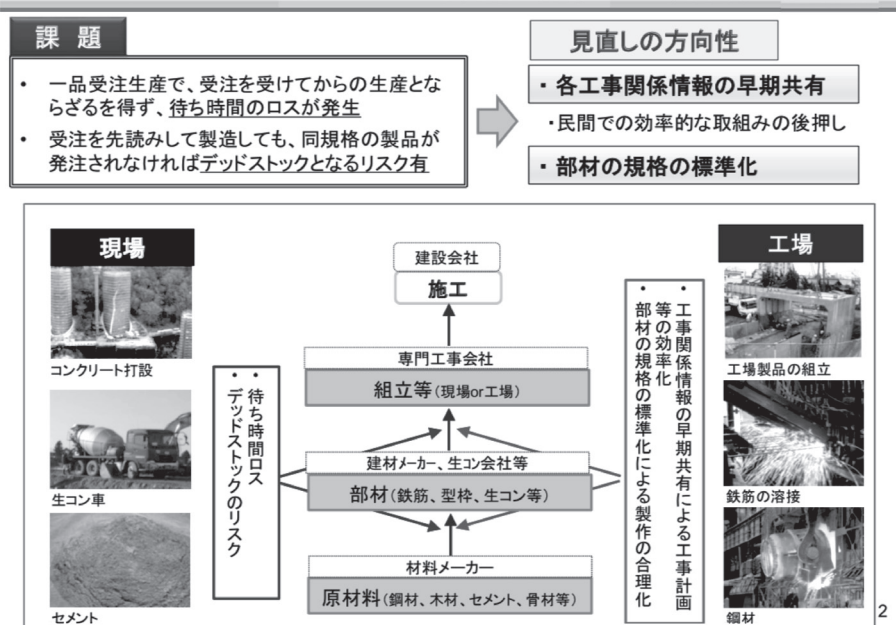
プレキャストコンクリート



出所) 筆者撮影: 2021年12月(山梨県南アルプス市, 協力: 湯澤工業)

写真 26 湯澤工業の護岸工事現場とプレキャストコンクリート

サプライチェーンマネジメントの課題と見直しの方向性³⁵⁾ 国土交通省



出所) 国土交通省コンクリート生産性向上検討協議会 [2017], 2 ページより借用。

図 25 コンクリート工にみるサプライチェーンマネジメントの課題と見直しの方向性

スタートアップによって中小建設業・中小規模工事に適合する建設 3D プリンタの「あるべき姿」が提起されていることの意義は大きい。つまり、建設 3D プリンタの事業化自体が、i-Construction や建設 DX，インフラ DX の文脈で沸騰する技術開発の熱気と中小建設業者のデジタル実装に対する冷静な客観的評価の温度差に関する問題提起になっていると、筆者は考えている。本稿による建設生産システム高度化へのインプリケーションに向けて、当該ケースから描き出せるキーポイントは「問題提起型事業」である。

5. インプリケーション：可変スコープ型建設生産システム構築に向けて

本稿は 3 つのケースから建設生産システム高度化へのキーポイントを「ボトムアップ型技術開発」，「スピルオーバー効果」，「問題提起型事業」として描出している。これら 3 つのキーポイントが示すベクトルを「フレキシビリティ」を結節点に交錯させることで、デジタル実装と自律施工技術のシステム化にみる「建設生産システム」の「強みをさらに強くする」ための着眼点を探ってみよう。本邦建設業の強みは熟練ノウハウ、現場経験・知見に立脚する変動対応力にある（善本〔2022〕）。この変動対応力を活かす自動化施工が、業界改革を導くデジタル実装の一つの論点になる。つまり、本稿が素描を試みる 3 つのベクトル交錯から導くインプリケーションの目的は、変動対応力とデジタル実装をミックスアップさせるフレキシブルな建設生産システム構築への要石を形作ることと、その企業・工事規模の適用範囲である実装スコープの自由度を高める自動化施工の方向性を探ることである。つまり、実装スコープの可変性を持たせたフレキシブル建設生産システムの考え方を素描していく。

以上を視野に、次では筆者が遭遇した中小建設業者の変動対応現場のありようをみていく。

5.1 中小建設業者が有する変動対応力の束：建設フレキシビリティ能力

写真 27 は本稿ケースで取り上げた愛亀 PJ の現場写真であり、オーバーレイ工事中に切削機のオイルホースが突如と破損したため、作業者が手で穴を防いでいる風景である³⁵⁾。写真 28 は 2 台の切削機で施工を進めている風景である。切削完了スケジュールに合わせ、舗装のための加熱アスファルトが現場に搬送されてくる。切削完了が遅れると、準備されたアスファルトが冷えてしまい、施工ができなくなってしまう。そのため、新たな切削機を手配し、現場投入したわけだが、オイルホース破損の切削機も現場で部品交換により修理復帰したため、予定通りの段取りで舗装すべく 2 台同時に機械を稼働させた。

愛亀は複数の切削機を自社保有しているため代車手配がスムーズに出来たわけだが、ここで注目すべきは、その場で 2 台同時切削の意思決定とともに、それが可能となるよう現場作業を組み直した臨機応変な対応力である。当初の作業編成を変えることができた背景には、非定

常的・変動的な施工条件下で蓄積してきた経験・知見とそれに呼応する技能がある。

愛亀は自社保有する建機をメンテナンスする工場およびスタッフの経営資源を持っており予防保全をしっかりしているわけだが、そうであっても故障トラブルなどをすべて未然に防ぐことは難しい。こうした建機トラブルの他に、すでに述べたように建設プロセスは自然依存性、作業環境の一過性といった特徴を持つため、非定期的・変動的な施工条件に毎度直面するのが常時のオペレーションである。例えば、写真 29 は京都府城陽市のとある施工現場の地中に埋まっていた巨石である。掘削作業をするまで、地中にあることがわからなかった。巨石を除去しなければ、進捗が遅れることになる。他に、想定より緩い地盤や天候による作業不能などが多発する。優良施工業者は、こうした場面に直面し、解決を試みることで現場が内包する常態的変動性を柔軟に取りさばく知見やノウハウを固有の能力として磨いているとよい。また、熟練作業者の技能がその能力を支えている。この能力と技能が、受注競争において選ばれる力となってくる。地方圏の中小建設業者は得意な施工分野を持つケースが多い。例えば、本稿ケースの愛亀は道路・管路工事を得意とするなどである。先述の写真 28 で紹介した愛亀 PJ のトラブル対応は得意な施工分野で発揮された同社の強みであり、変動対応力であるといつてよい。

土木工事の現場では多様な変動要因が複雑に絡み合い、一過性の作業環境を作り出し、また想定外の事象が頻繁に発生する。こうした常態的変動性を柔軟に取りさばき、対応する知見やノウハウ、技能等の「変動対応力の束」を、本稿では「建設フレキシビリティ能力」と位置づける。



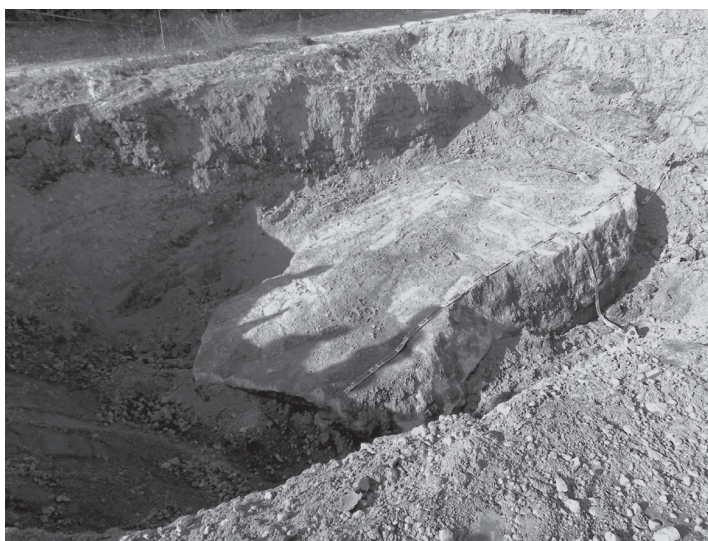
出所) 筆者撮影：2021年11月(愛媛県砥部町, 協力: 愛亀)

写真 27 愛亀 PJ での切削機オイルホース破損のアクシデント



出所) 筆者撮影：2021年11月（愛媛県砥部町，協力：愛亀）

写真 28 切削機 2 台による切削



出所) 筆者撮影：2021年11月（京都府城陽市）

写真 29 現場の掘削で現れた巨石

5.2 デジタル実装と変動対応力の共鳴

中小建設業者がデジタル実装を検討するにあたって、同様規模の企業が先導的にボトムアップ型技術開発に取り組むケースはレファレンスモデルとしての期待が大きい。他方で、本稿が取り上げた A⁴CSEL に代表される大規模な自動化施工の開発・実用化の動きも加速している。

すでに述べたように、自動化施工の現状では中小建設業者が受注した工事でヒューリスティックに試行錯誤や検証作業を実施することは難しい。そのため、大手ゼネコン主導による自動化施工の開発・実用化競争によって制約条件や課題を克服する上での新たな設計解が導かれ、さらにそこから波及的に汎用化・コモディティ化が広がっていく技術のスピルオーバー効果が業界活性を刺激する可能性がある。また、こうした大手ゼネコンからの技術スピルオーバーと中小建設業者によるボトムアップ型技術開発との交錯する領域が生まれ、そこで自動化施工の実装容易性を高めるシステム化技術や要素技術、サブシステム開発が醸成されるようになれば、就業者不足と減少、また高齢化など人材問題に悩む地方圏社会インフラの維持管理・整備に光明が見えてくるかもしれない。

こうした技術体系や開発コンセプトが混和する領域こそ、スタートアップのビジネスチャンスになる。本稿ケースの Polyuse はその空白区域を捉え、混和に向けた問題提起型の事業を展開しているといつてよい。建設 3D プリンタ開発は自動化施工が視野に入っている (石関他 [2021])。他方で、吉村建設工業にみるコンクリート工生産性向上のように中小建設業者が求める課題解決ニーズと 3D プリンタによる自動化施工推進の方向性に隔たりも見られる。自律施工技術のシステム化において、その技術の混和領域でスタートアップがチャレンジングに事業を立ち上げてくるのが期待される。Polyuse の 3D プリンタそれ自体がコンクリート工の段取り変更に対応するためのシステムとして設計されているため、中小建設業者の「建設フレキシビリティ能力」を活かす効果的なツールとなる。

自動化施工や自律施工技術による省力化・生産性向上実現への熱望が強い。しかし、これらシステム技術の現場実装が人材問題解決に結びつくとしても、「建設フレキシビリティ能力」にみる強みが制約を受けることは避けなければならない。2022 年時点の自動化施工は、基本的に繰り返し作業・反復作業を自動運転化する ICT 建機あるいは STCRs をシステム化するものである。自動運転のロバスト性を高めようとすればするほど、吸収しきれない変動要因に対応できる能力の重要性が際立ってくる。

自動化できない領域補完や現場状況変化への対応方法の確立に関する論点提示や熟練技能者の対応力、問題発見・解決力を AI 手法等で「熟練性」として定量化、また建機動作を最適化する試みが進められている (三浦 [2017], 三浦 [2021 a])。つまり、現場が内包する変動性に対して即座に対応できる建設フレキシビリティ能力の機械化・システム化およびオペレータの能力構築が自律施工技術のシステム化を次のステージへとステップアップさせる触媒となる。

施工会社であるか建機メーカーであるか、また、企業規模を問わず、「フレキシビリティ」を活かす処方箋は業界の強みを活かす技術テーマである。中小建設業者、大手・準大手ゼネコン、スタートアップが投ずるベクトルを交錯させ、研究開発成果を重ね合わせる混和型の建設プロセス革新のテーマ設定が、自律施工技術と変動対応力、つまりデジタル実装と建設フレキ

シビリティ能力を共鳴させることである。その一つが、自律施工技術を土台とする「フレキシブル建設生産システム」である。

他方で、フレキシブル建設生産システムを混和型のテーマとする場合は、その実装スコープが重要になる³⁶⁾。発展途上の自動化施工では、先述のように System of Systems のコア技術が大手ゼネコンを中心に競争領域となっており、クローズドな展開の傾向にあるとあってよい。そのため、ボトムアップ型技術開発のベクトルを混和型テーマへと方向づけるためには、フレキシブル建設生産システムを実装先の工事規模・企業規模を問わないオープンシステムとして開発する場が必要となってくる。そうした場づくりの動きが、本邦建設業でも出てきている。

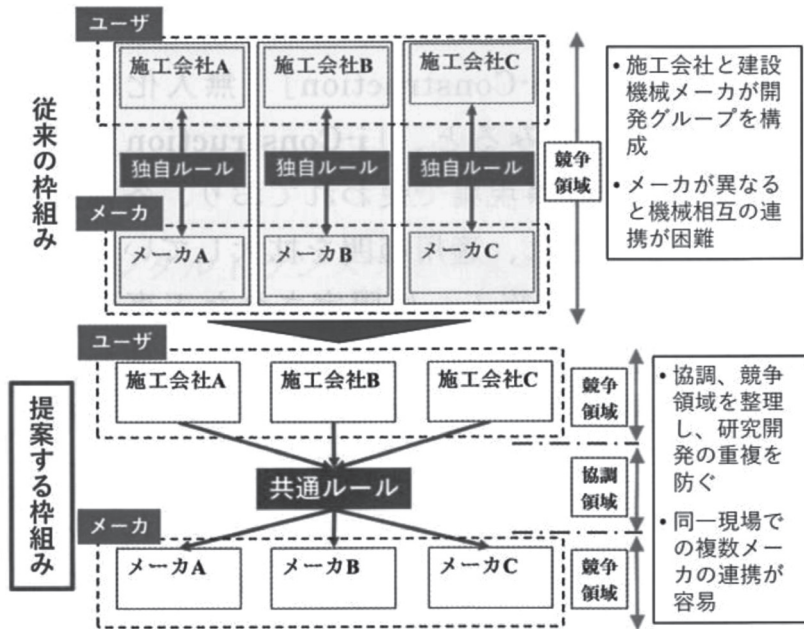
5.3 オープン・プラットフォーム開発と活用：実装スコープの可変性

自動化施工開発が加速する中で、研究開発投資の重複や建機・技術の汎用性に関する問題提起がなされ、協調領域の設定、自律施工技術基盤（プラットフォーム）の整備、安全ガイドライン・監督検査方法の提案、建設 DX フィールドの活用が国立研究開発法人土木研究所（以下、土木研究所）主導で進められている（岩見〔2021〕）。図 26 は協調領域の考え方を示している。土木研究所は「依然として異なる建設機械メーカー間の機種を統合して制御するシステムは存在しない。大規模な建設現場が単一のメーカーのみで工事が実施されることは少なく、かつ開発したシステムの再利用を考慮すると、自律施工を推し進めるためには、異なるメーカーの頃成る機種を横断的に制御できる枠組み、システム（建設機械との通信における協調領域の設定）が必要である」³⁷⁾ とし、「機体間の連携性を向上させることを可能とする、建設機械の共通制御信号」³⁸⁾ の提案と「建設機械自律施工プラットフォーム」の開発を進めている。上述の自律施工技術基盤（プラットフォーム）の整備、がこの提案と開発にあたる。図 27 は当該プラットフォームの概念図である。

本稿は大手ゼネコンによる自動化施工開発からの技術スピルオーバーについて言及したが、その効果を形にするためには、技術の汎用化に向けた受け皿となる協働開発の仕組みが不可欠になってくる。また、そうした仕組みが建設スタートアップによる問題提起、またニッチ領域の技術開発成果をさらに進歩させる機会にもなる。土木研究所主導の建設機械自律施工プラットフォームはオープンシステムであり、大手・準大手ゼネコンのシステム技術汎用化やボトムアップ型技術開発およびスタートアップ刺激のトリガーとして機能することが期待されているとあってよい³⁹⁾。

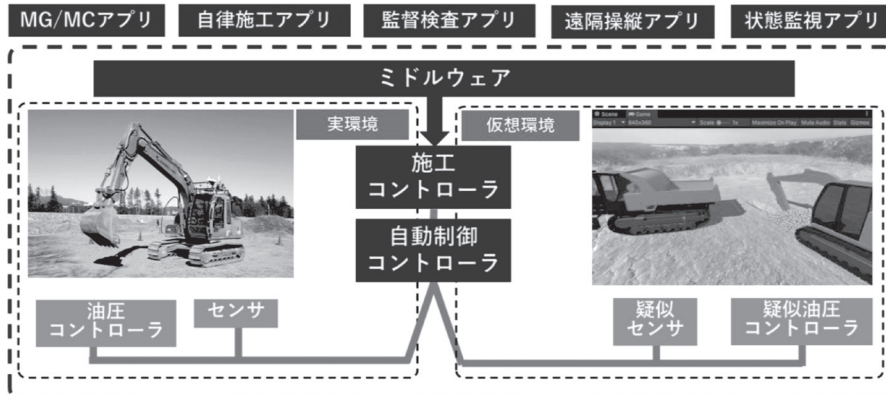
こうしたオープンシステムの協働開発を手掛かりに実装スコープの可変性を組み込んだ自動化施工の方向性を検討できれば、デジタル実装をテコとする建設生産システム高度化の新たな活路が見えてくると考えられる。つまり、フレキシブル建設生産システムの適用範囲に自由度

を持たせる「可変スコープ型建設生産システム」が大手・準大手ゼネコン、中小建設業者、スタートアップの技術ベクトルの合成に向けた協働開発ターゲットになりうると、本稿では考えている。繰り返しになるが、本邦建設業は就業者の不足・減少・高齢化によって、産業構造変革の大きな岐路に立っており、デジタル実装による建設プロセス革新と生産性向上を目指している。この業界全体が渴望する無人化施工、そして自動化施工の実装スコープを企業・工事規模を問わない中小フィールドに拡張する意義は大きい。



出所) 岩見 [2021], 6 ページより借用。

図 26 土木研究所主導の協調領域の提案



出所) 山内他 [2021], 182 ページより借用。

図 27 土木研究所による自律施工プラットフォームの概念図

自律制御技術のシステム化が競争優位獲得に向けたクローズドな取り組みへと誘引されがちであることから、土木研究所にみる官民協働によるオープンシステム開発の提起は業界全体への普及拡大を狙うものとして、協調領域の枠組みがより強調されている。この枠組みを活かすためには、大手・準大手ゼネコンによる技術フロンティアの開拓競争が重要な意味を持つ。技術フロンティアが競争領域であることによって、協調領域へとスピルオーバーしてもよい技術が生まれ、汎用化しやすくなることも考えられる。大手・準大手によるシステム化競争を業界全体の課題解決へのプラス貢献と紐付けるべく、オープン・プラットフォームをベースとする「可変スコープ型建設生産システム」の設計思想が技術ベクトルの合成を導く上で重要な意味を持ち始めてくる。

6. おわりに

本邦建設業のデジタル実装は多面的な趨勢を見せている。本稿はそうした流れを3つのケースから見て取れる技術ベクトルとして描き出し、その交錯する結節点を設定することから建設生産システム高度化の断片を読み解く作業を試みている。その目的は、適用規模の自由度を持った「可変スコープ型」の自動化施工システム開発に向けた論点を描き出すことである。そのインプリケーションとして導き出したのが、フレキシビリティと実装スコープの可変性を併せ持った自律施工技術のシステム化、つまり企業規模・工事規模を問わず、変動的な施工現場属性に柔軟に対応する能力を発揮できる自動化施工のシステム化思想の業界共有である。その土台形成はオープンなプラットフォーム開発提案にみるように機が熟してきていると考えられる。中小建設業者によるボトムアップ型技術と大手・準大手ゼネコンの技術成果、スタートアップによる新機軸の発想の共振、呼応が本邦建設業の新たな成長エンジンを作り出す。

こうした文脈において、本稿がキーポイントの一つとしたスピルオーバーの用語使用は意図せざる結果を含むとも解釈できるため、能動的な協働スタンスの触発を示す意味では適切ではないといえる。また、施工会社を中心とした論考であり、建機メーカーの動きを踏まえた論点整理が出来ていない。本稿はこうした不十分さと限界を持っているが、デジタル実装と建設フレキシビリティ能力のシナジー効果をいかに生産システムとして具現化するかに関する視点を提示できたものと考えている。

<注>

- 1) 本研究は第 21 回および第 22 回国土技術研究センター研究開発助成制度，科研費基盤研究 (C) 研究課題番号「17K03980」の研究支援を受けている。また，令和 3 年度 (2021 年度) の国土交通省「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」の阿部建設コンソーシアムおよび愛亀コンソーシアムの成果を活用している。阿部建設コンソーシアムとは，阿部建設株式会社を代表に株式会社環境風土テクノ，株式会社堀口組，株式会社建設 IoT 研究所，一般社団法人北海道産学官研究フォーラム，北海道大学，立命館大学が参画する研究開発体制である。愛亀コンソーシアムとは，愛亀株式会社を代表に株式会社環境風土テクノ，可児建設株式会社，応用技術株式会社，i システムリサーチ株式会社，立命館大学が参画する研究開発体制である。本研究は阿部建設コンソーシアム参画の企業・研究組織，愛亀コンソーシアム参画の企業・研究組織，鹿島建設株式会社，株式会社 Polyuse，西尾レントオール株式会社，湯澤工業株式会社，国土交通省九州地方整備局筑後川河川事務所九州北部豪雨復興出張所から現場調査等の協力を得ている。研究調査協力に深謝したい。なお，本稿は執筆者個人の見解であり，また，事実間違い等の責は筆者にある。
- 2) i-Construction とは「ICT の全面的な活用 (ICT 土工) 等の施策を建設現場に導入することによって，建設生産システム全体の生産性向上を図り，魅力ある建設現場を目指す取組」である (国土交通省 i-Construction ホームページ：<https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html> (2021 年 8 月 10 日閲覧))。その展開や論点，動向について，例えば建山 [2019] を参照されたい。
- 3) i-Construction 推進のポイントとして，「建設現場を最先端の工場へ」が掲げられている。国土交通省 i-Construction 委員会 [2016] を参照されたい。
- 4) 北海道開発局 [2021]，1 ページ。
- 5) 北海道開発局 [2021]，2 ページ。
- 6) 同賞の選考対象工事等とは，次の 9 つの項目【3 次元測量・設計，ICT 施工 (ICT 建機の活用のみを行った取組も含む)，BIM/CIM，プレキャスト活用等の全体最適化により生産性向上に顕著な成果が得られたもの，新技術活用により生産性向上に顕著な成果が得られたもの，ICT を活用した施工管理・工程管理，i-Construction に係る担い手確保・人材育成，デジタル技術を活用し生産性向上に関し創意工夫に努めたもの，前各号に掲げるもののほか，建設現場の生産性向上に顕著な成果が得られたもの】で整理，記載されている (北海道開発局 [2021])。BIM とは Building Information Modeling，CIM とは Construction Information Modeling の略称である。
- 7) 愛亀は国際協力機構 JICA のプロジェクトを契機に道路維持管理でカンボジア進出するなど，アジアで事業展開に積極的である。「道路整備 アジアに歩み 愛亀，カンボジアで受注」『日本経済新聞』地方経済面四国，また，伊予銀行 [2019]，独立行政法人国際協力機構・愛亀 [2015]，を参照されたい。
- 8) 切削オーバーレイ工法は道路舗装として深くまで破損していないと想定される舗装面まで切削し，その上に新たな層を重ねて打設する方法である。
- 9) RD-MC は株式会社トプコンの商品である。
- 10) 国土交通省大臣官房技術調査課 [2021 a]，1 ページ。
- 11) 九州北部豪雨復興事務所へのインタビュー調査による (2021 年 12 月)。
- 12) A⁴CSEL のターゲットは「製造業における産業ロボットや CNC 加工機のように，多様の作業が可能な自動化機械を用い，それらを制御信号にて自在に動作させるシステムを築くことによって建設作業の自動化率，機械化率を上げる。その結果，真に熟練の技が必要なものだけを人が担当し，それ以外は自動機械が分担する施工システム」とされる (三浦 [2017]，24 ページ)。当該システムを構成する自動運転技術等については三浦他 [2015]，三浦 [2016]，三浦 [2021 a] も参照されたい。A⁴CSEL の適用および稼働現場のケースとしては，2021 年 8 月段階で秋田県の成瀬ダム堤体打設工事，赤谷 3 号砂防堰堤工事がある。
- 13) 三浦 [2017]，24 ページ。

- 14) A⁴CSEL は専用機の開発ではなく、汎用建設機械を改造することで自動運転を実現している。
- 15) 成瀬ダムは鹿島建設、前田建設工業株式会社、株式会社竹中土木の3社による特定JV（特定建設工事共同企業体）で建設されている。
- 16) 三浦〔2021 a〕, 123 ページ。
- 17) 紀伊半島大水害について、災害対応記録である国土交通省近畿地方整備局企画部企画課〔2014〕を参照されたい。
- 18) 高田〔2021〕, 44 ページ。
- 19) 大林組の OTISM は <https://www.obayashi.co.jp/tunnelworld/system/mountain/>（2022年2月2日閲覧）、大成建設の T-iCraft は https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2021/210209_5072.html（2022年2月2日閲覧）、コマツのスマートコンストラクションは四家〔2021〕、日立建機の ZCORE は日立製作所〔2021〕、また、<https://www.hitachicm.com/global/jp/news-jpn/press/20-08-19/>（2021年8月20日閲覧）を参照されたい。
- 20) 高田〔2021〕, 44 ページ。
- 21) NDSM ワーフはオランダ・アムステルダムにある閉鎖された旧造船所（The Nederlandsche Dok en Scheepsbouw Maatschappij: Netherlands dock and shipbuilding company）跡地であり、シェアオフィスとしてリノベーションされたスペースである。
- 22) 建設土木における金属 3D プリンティングへの期待と課題については、Kanyilmaz et al.〔2022〕を参照されたい。そこでは日本国内の i-Construction にも言及しながら、デジタル技術やロボット技術の活用、そして金属 3D プリンティングの積極的な活用が建設業界の生産性向上にとって重要であるとの見解を示している。
- 23) コンクリート工の生産性向上の動向について、栗原・清〔2020〕を参照されたい。
- 24) 大林組はデンカ株式会社、大成建設は太平洋セメント株式会社（以下、太平洋セメント）とセメント材料分野で協働している。また、大成建設は太平洋セメントの他、当該 3D プリンタ開発でレンタル業者の株式会社アクティオ、有明工業高等専門学校とも協働している。
- 25) 日本コンクリート工学会に設置されている 3D プリンティングによるコンクリート構造物構築に関する研究委員会は、「3D プリンティングによるコンクリートの施工法は、これまでの施工法を画期的に変えるものであり、型枠不要で省力化や工期短縮に寄与することはもとより、構造最適化など設計の合理化につながる可能性がある。一方、実現にあたっての課題も数多くあり、3D プリンティングで施工可能なコンクリート物性の明確化、性能を実現するための材料開発、耐久性や構造安全性確保のための方法など、検討が必要な項目は多い」（日本コンクリート工学会「3D プリンティングによるコンクリート構造物構築に関する研究委員会ホームページ、<http://www.jci-net.or.jp/~tc185f/shushi.html> : 2022年1月30日閲覧）と、技術への期待とともに実用化に向けた課題の多さを指摘する。
- 26) 日経 BP〔2021 b〕, 57 ページ。
- 27) 日経 BP〔2022〕を参照。
- 28) 日経 BP〔2021 a〕, 22 ページ。
- 29) 日経 BP〔2021 b〕, 56 ページ。
- 30) Polyuse へのインタビュー調査による（2021年11月）。
- 31) 日経 BP〔2021 b〕, 57 ページ。
- 32) 日経 BP〔2021 b〕, 57 ページ。
- 33) i-Construction ではコンクリート工も含め、建設プロセス全体のサプライチェーン改革について言及している。
- 34) Polyuse へのインタビュー調査による（2021年11月）。
- 35) 愛亀は自社保有する建機をメンテナンスする工場およびスタッフの経営資源を持っており予防保全をしっかりとっているわけだが、故障トラブルなどをすべて未然に防ぐことは難しい。
- 36) 本稿が取り上げた愛亀 PJ、また愛亀 MC の取り組みは中小建設業者による実装スコープ拡張のケースと位置づけることも可能である。また、西尾レントオールなどによるレンタル、かつ技術支援を受

けられることで、ボトムアップによる自律施工技術に向けた検証や個別現場での実証実験や研究開発も視野に入れることが可能な環境も整いはじめている。

- 37) 山内他 [2021], 179 ページ。
 38) 山内他 [2021], 179 ページ。
 39) 建設機械自律施工プラットフォームはミドルウェアとしてオープンソースの ROS (Robot Operating System) を採用し、それをベースに当該研究所で独自のパッケージを開発している (山内他 [2021])。また、このプラットフォームに関して、土木研究所先端技術チーム [2021] を参照されたい。

<参考文献>

【書籍・論文・記事】

- 東大智 [2021] 「コンクリート 3D プリンタの取り組み 自由な形状のコンクリートをプリント」『土木施工』Vol.62, No.1, 152～154 ページ。
 Bock, Thomas and Thomas Linner [2016] *Construction Robots- Elementary Technologies and Single-Task Construction Robots*, Cambridge University Press.
 Gardner, Leloy, Pinelopi Kyvelou, Gordon Herbert, and Craig Buchanan [2020] “Testing and Initial Verification of the world’s First Metal 3D Printed Bridge.” *Journal of Constructional Steel Research* 172., pp.1-10.
 羽生賢一・八木橋宏和・永沢薫 [2020] 「コンクリート構造物を [現場で直接プリント造形] On-Site Shot Printer の開発」『建設機械施工』Vol.72, No.12, 45～51 ページ。
 岩見吉輝 [2021] 「自律施工技術の今後の展望」『土木技術資料』Vol.63, No.9, 5～7 ページ。
 Kanyilmaz, Alper, Ali Gökhan Demir, Martina Chierici, Filippo Berto, Leroy Gardner, Sastry Yagnanna Kandukuri, Paul Kassabian, Takuya Kinoshita, Andrea Laurenti, Ingrid Paoletti, Anton du Plessis, Seyed Mohammad Javad Razavi [2022] “Role of Metal 3D Printing to Increase Quality and Resource-efficient in the Construction Sector.” *Additive Manufacturing* 50., pp.1-17.
 橋川武郎 [2000] 「競争パターンと産業の競争力」宇田川勝・橋川武郎・新宅純二郎『日本の企業間競争』有斐閣, 263～276 ページ。
 木ノ村幸士 [2020] 「建設用 3D プリンタを用いた PC 構造体の設計施工デモ実証と今後の展望 生産性向上と新たな構造の実現を目指して」『建設機械施工』Vol.72, No.12, 52～56 ページ。
 栗原和彦・清憲三 [2020] 「コンクリートの生産性向上検討協議会の動向」『建設機械施工』Vol.72, No.9, 5～13 ページ。
 黒河洋吾・春木一也 [2019] 「映像を活用した舗装補修工事における品質管理の高度化について」『建設マネジメント技術』2019年9月号, 43～47 ページ。
 Laghi, Vittoria, Michele Palermo, Giada Gasparini, Tomaso Trombetti [2022] “Computational Design and Manufacturing of a Half-scaled.” *Additive Manufacturing* 36., pp.1-13.
 真下英邦 [2021] 「DXにより創る次世代建設生産システムとスマートな世界」『建設機械施工』Vol.73, No.7, 25～31 ページ。
 三浦悟 [2016] 「建設機械の自動化による次世代の建設生産システムの開発—施工現場における安全性と生産性の革新を目指して」『土木学会誌』Vol.101, No.1, 24～25 ページ。
 三浦悟 [2017] 「建設機械の自動化を核とした次世代施工システム—革新的施工システムにおける土木技術者の役割」『土木学会誌』Vol.102, No.12, 24～25 ページ。
 三浦悟 [2021 a] 「次世代建設生産システム A⁴CSEL の適用 現場の工場化への取り組み」『土木施工』Vol.62, No.1, 120～123 ページ。
 三浦悟 [2021 b] 「グーグルのようなユーザー視点の開発が重要」『日経コンストラクション』2021年10月11日号, 42～43 ページ。

- 三浦浩・黒沼出・浜本研一〔2015〕「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（クラウドアクセル）」『建設機械施工』Vol.67, No.12, 21～25 ページ。
- 三浦浩・牟田口茂・岩野圭太〔2020〕「自動化技術によるトンネル施工の生産性向上～コンクリート吹付けの自動化～」『土木施工』Vol.61, No.1, 96～99 ページ。
- 水野正樹・山越隆雄・清水武志〔2021〕「紀伊半島大水害における河道閉塞（天然ダム）発生時に活用された技術とその後の研究開発の取組み」『土木技術資料』Vol.63, No.8, 8～11 ページ。
- 森下博之・増竜郎〔2021〕「建設用ロボット（無人化施工）」日本建設機械施工協会『情報化施工の基礎～i-Constructionの普及に向けて』日本建設機械施工協会, 11-1～11-17 ページ。
- 日経 BP〔2019〕「トピックス 建設 3D プリンター 多品種少量生産に向け、設計・施工を刷新」『日経アーキテクチャ』2019 年 7 月 25 日号, 64～71 ページ。
- 日経 BP〔2020〕「建設 3D プリンター 開発は海外が先行」『日経コンストラクション』2020 年 1 月 13 日号, 47 ページ。
- 日経 BP〔2021 a〕「3D プリンターで造った集水升を実装」『日経コンストラクション』2021 年 8 月 23 日号, 22 ページ。
- 日経 BP〔2021 b〕「建設スタートアップ探訪 Polyuse 3D プリンターの社会実装にまい進」『日経コンストラクション』2021 年 10 月 11 日号, 56 ページ。
- 日経 BP〔2022〕「建設 3D プリンター 多様な本設構造物へ利用拡大」『日経コンストラクション』2022 年 1 月 10 日号, 50 ページ。
- Perrot, Arnaud and Damien Rängeard〔2019〕“3D Printing with Concrete: Impact and Designs of Structures.”, Perrot, Arnaud ed. *3D Printing of Concrete: State of the Art and Challenges of the Digital Construction Revolution*, ISTE Ltd. and
- 四家千佳史〔2021〕「[スマートコンストラクション] で実現する建設産業の DX」大前研一編『DX 革命』プレジデント社, 167～194 ページ。
- 高田悦久〔2021〕「建設会社は施工方法で競争する時代に」『日経コンストラクション』2021 年 10 月 11 日号, 44 ページ。
- 建山和由〔2019〕「建設技術の新たなステージ i-Construction」社会基盤技術評価支援機構・中部編『i-Constructionの最前線』理工図書, 1～24 ページ。
- 宇田川勝・新宅純二郎〔2000〕「なぜ、いま企業間競争なのか」宇田川勝・橋川武郎・新宅純二郎『日本の企業間競争』有斐閣, 1～22 ページ。
- 矢作智之〔2018〕「コンクリート工における生産性向上—[i-Construction 全体最適の導入]—」『土木施工』Vol.59, bNo.1, 34～35 ページ。
- 山内元貴・遠藤大輔・橋本毅・山口崇〔2021〕「自律施工における協調領域の提案と自施工技術基盤の開発」『令和 3 年度 建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集』一般社団法人日本建設機械施工協会, 179～182 ページ。
- 善本哲夫〔2022〕「建設生産システム革新とフレキシビリティ—自律分散制御型生産システム構築に向けた業種横断的論点—」『デザイン科学研究』Vol.1, 1～37 ページ。

【インターネット上で公開されている官公庁、業界団体、企業の報告書・製品資料・技術報等】

- 土木研究所先端技術チーム〔2021〕「自律施工技術開発促進に向けた土木研究所の取組およびデモンストラクション」(<https://www.pwri.go.jp/team/advanced/pdf/ziritsu-demo.pdf> : 2022 年 1 月 20 日入手)。
- 独立行政法人国際協力機構・株式会社愛亀〔2015〕「カンボジア国 高品質な道路補修材の普及と舗装マネジメントシステムに係る案件化調査報告書 (JICA 報告書 PDF 版)」(<https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12238218.pdf> : 2022 年 2 月 2 日入手)。
- 日立製作所〔2021〕「プロダクト 自律型建設機械プラットフォーム [ZCORE]」『日立評論』Vol.103, No.1 (<https://www.hitachihyoron.com/jp/archive/2020s/2021/01/16/index.html> : 2021 年 11 月 10 日閲覧)。

- 北海道開発局 [2018] 「プレスリリース 国道 5 号倶知安余市道路 (倶知安～共和) 着工式開催」 <https://www.hkd.mlit.go.jp/ot/release/a8pgkh0000004y6z-att/a8pgkh0000005yc4.pdf> : 2021 年 10 月 25 日入手)。
- 北海道開発局 [2021] 「北海道開発局インフラ DX・i-Construction 先導事務所を設置し取組を全道で推進します！」 (https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/jg/gijyutu/splaat0000001xke-att/PR_sendo.pdf : 2021 年 1 月 10 日入手)。
- 北海道開発局 [2020] 「北海道開発局 i-Con 奨励賞の創設について (R2/2/6 局長会見)」 (<https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/jg/gijyutu/splaat000001w00p-att/splaat000001w04o.pdf> : 2022 年 1 月 10 日入手)。
- 石関嘉一・金子智弥・坂上肇・中村允哉・武田篤史 [2021] 「3D プリントを用いたコンクリート構造物の自動化施工の取組み」『大林組技術研究所報』No.85 (https://www.obayashi.co.jp/technology/shoho/085/2021_085_17.pdf : 2021 年 12 月 3 日入手)。
- 伊予銀行 [2019] 「【カンボジア】株式会社愛亀様」『いよぎんグローバルレポート』Vol.6 (https://www.iyobank.co.jp/business/pdf/gr2019_vol06.pdf : 2022 年 2 月 1 日入手)。
- 鹿島建設 [2021] 「遠隔地の複数現場での自動化施工を同時に実現可能な [遠隔集中管制システム] を開発～A⁴CSEL を導入する全現場を東京の本社から一括でコントロール」 (<https://www.kajima.co.jp/news/press/202110/pdf/26c1-j.pdf> : 2022 年 2 月 10 日入手)。
- 国土交通省 [2018] 「建設現場の生産性を飛躍的に向上させるための革新的技術の導入・活用プロジェクト 試行内容 (概要) の紹介 (資料 2)」 (<http://www.mlit.go.jp/common/001259526.pdf> : 2021 年 6 月 2 日入手)。
- 国土交通省 [2020] 「i-Construction の取組について (i-Construction 推進コンソーシアム第 6 回企画委員会 資料 -4)」 (https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/pdf/04.6_kikaku_siryou4.pdf : 2022 年 2 月 10 日入手)。
- 国土交通省 [2021] 「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト試行内容 (概要) の紹介 (令和 3 年度, <https://www.mlit.go.jp/tec/content/001447205.pdf> : 2022 年 2 月 1 日入手)。
- 国土交通省コンクリート生産性向上検討協議会 [2017] 「第 4 回 資料 5 建設現場におけるサプライチェーンマネジメントの導入」 (<https://www.mlit.go.jp/common/001176466.pdf> : 2021 年 12 月 1 日入手)。
- 国土交通省コンクリート生産性向上検討協議会 [2021] 「第 10 回 資料 1 これまでの主な議論について」 (<https://www.mlit.go.jp/tec/content/001387419.pdf> : 2021 年 12 月 1 日入手)。
- 国土交通省大臣官房技術調査課 [2021 a] 「報道発表資料 建設現場の更なる生産性向上に向けて～令和 3 年度 i-Construction の主な取り組みについて～」 (<https://www.mlit.go.jp/common/001397717.pdf> : 2022 年 2 月 10 日入手)。
- 国土交通省大臣官房技術調査課 [2021 b] 「参考資料 更なる生産性向上に向けて」 (<https://www.mlit.go.jp/common/001397718.pdf> : 2022 年 2 月 10 日入手)。
- 国土交通省大臣官房技術調査課 [2021 c] 「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト試行技術集」 (<https://www.mlit.go.jp/tec/content/001404792.pdf> : 2022 年 2 月 7 日入手)。
- 国土交通省 i-Construction 委員会 [2016] 「i-Construction ～建設現場の生産性革命～」 (<https://www.mlit.go.jp/common/001127288.pdf> : 2021 年 8 月 29 日入手)。
- 国土交通省近畿地方整備局企画部企画課 [2014] 「2011 年 紀伊半島大水害 国土交通省近畿地方整備局 災害対応の記録 改定版」 (<https://www.kkr.mlit.go.jp/bousai/qgl8vl0000008ajd-att/kiihantou-kirokushi.pdf> : 2022 年 2 月 1 日入手)。
- 国土交通省水管理・保全局砂防部 [2011] 「プレスリリース 台風 12 号の豪雨に伴う河道閉塞箇所数について」 (https://www-1.kkr.mlit.go.jp/scripts/cms/plan/infoset2/data/pdf/info_16/20110929_08.pdf : 2022 年 2 月 10 日入手)。

- 坂上肇・石関嘉一・金子智弥・平田隆祥〔2018〕「技術紹介 セメント系材料を用いた 3D プリンターによる部材製造技術」『大林組技術研究所報』No.82, 1～2 ページ (https://www.obayashi.co.jp/technology/shoho/082/2018_082_42.pdf: 2021 年 12 月 3 日入手)。
- 坂上肇・中村允哉・穴吹拓也・金子智弥・松永成雄・福見祐司〔2020〕「建設用 3D プリンターにより製造したシェル型ベンチの設計と施工」『大林組技術研究所報』No.84, 1～6 ページ (https://www.obayashi.co.jp/technology/shoho/084/2020_084_44.pdf: 2022 年 12 月 3 日入手)。
- 産業競争力懇談会〔2016〕「IoT, CPS を活用したスマート建設生産システム」(<http://www.cocn.jp/report/thema85-L.pdf>: 2021 年 7 月 28 日入手)。

