

査読論文

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—

善 本 哲 夫*

要 旨

本稿の目的は、建設業と製造業による生産システム高度化の共創に向けたシナリオ検討の予備的考察である。デジタル技術の発展は建設業と製造業の各生産システムの境界区分を縮めつつある。業種を越えて、両業界が目指す生産システムの方向性は同じであり、それは自律分散制御型システムの確立である。

以上を背景に、本稿は建設生産システム革新の論点の抽出を試みる。その視点の中心は、デジタル技術と製造業のカイゼン知見の活用である。建設業界は生産性向上に向けた施策である i-Construction を推進しており、これは、デジタル技術の現場への積極的な導入である。業界全体の大きな方向性として、建設業は自律分散型生産システムの開発を目指している。

建設生産システムは、変動性が高く、非定常性の現場環境でのオペレーションが求められる。変化への対応能力とフレキシビリティの高さが、優良な建設現場の強みである。建設業から、フレキシブル生産システム高度化に向けた先進的なケースが生まれる可能性がある。変種・多様性生産を切り口に、建設業と製造業は自律分散制御型システムについて相互学習することが可能である。

キーワード：建設生産システム、自律分散制御、異業種横断的共創、i-Construction、フレキシビリティ、変種・多様性生産

1. はじめに
2. 建設業の人手不足問題
 - 2-1. 建設就業者数の減少と高齢化
 - 2-2. 社会インフラ整備への懸念
3. i-Construction の推進
 - 3-1. i-Construction
 - 3-2. 情報化施工
 - 3-3. 無人化施工の発展と自動化施工指向
4. i-Construction 推進下の建設業における生産性向上の論点
 - 4-1. 生産システムのフレキシビリティ
 - 4-2. 生産工学アプローチと作業ロス改善アプローチ
 - 4-3. 建設業における生産性向上の論点
5. おわりに

* 立命館大学経営学部 教授

1. はじめに

深刻さを増す労働力確保問題を背景に、建設業でデジタル技術を活用した自律分散制御型建設生産システム確立への期待が高まっている。本稿の狙いは製造業の知見を建設業で活用する視点から、施工現場におけるデジタル技術実装の中で推進される生産性向上および建設生産システム高度化の論点を試論的に描き出すことにある。その目的は、今後の生産システム研究の方向性として、建設業と製造業における業種横断的・異分野融合的な生産システム革新の知見相互利用の可能性を探る道筋を検討することにある。つまり、本稿は建設業と製造業の異分野融合領域を探るための本格的調査に向けた予備考察の位置づけにある¹⁾。

少子高齢化及び人口減社会を迎え、本邦産業界において生産年齢人口減少による人手不足が深刻な問題となり、各業界で各種対策が検討されているが、なかでも3K（キツイ、汚い、危険）職場のイメージが持たれる建設業では、就業者が減少の一途をたどり、作業従事者の不足および高齢化が著しい。就業者減少・高齢化は、国内の社会インフラ整備の持続性を損ないつつあり、業界内には強い危機感がある。就業者減少・高齢化が持つネガティブ・インパクトは新設工事等とともに、既存インフラの維持管理・更新にも強く影響している。日本国内では2010年代以降、過去に一斉整備された社会インフラが更新時期を迎え、安定的な機能の提供が困難になる時代を迎えている。多くの産業がIoT（Internet of Things）やAI（Artificial Intelligence）にみる新たなデジタル技術の活用に注視する中で、建設業はデジタル技術導入による生産性向上・合理化の動きを活発化させている。その着火点は、国土交通省による「i-Construction」のコンセプトで示されているデジタル技術を活用した生産性革命の旗揚げである。

製造業では作業方式の見直しやレイアウト変更などの多様な現場改善による生産性向上、工作機械やロボット導入等による対応が人手不足の一つの解決策となる。他方、工場内でオペレーションを展開する製造業と違い、建設業の施工現場は作業対象が属地的で多様であり、かつ同じ現場でも施工の進捗や天候条件によって作業対象の姿が常時変動するため、作業の標準化や自動化の推進が容易ではない。可変する施工条件のありようが建設業の生産性向上のハードルをあげている。

建設分野はICTの積極的活用に注力している。i-Constructionの基軸はICT（Information and Communication Technology）実装にあり、情報化施工の加速度的な普及による業界全体の生産性向上が目指され、また、建設現場の工場化や自動化施工の論点も重視されている²⁾。ICT実装・活用は施工のみならず、測量、設計から維持管理までの建設プロセス全体をデータによって有機的につなぐこともターゲットになっている。ドローンや3Dレーザースキャナの導入、また、ICT建機や建設ロボットなどの生産技術開発・実装をみれば、i-Constructionは建設業固有の課題解決として映るが、その一方で生産性向上に向けた技術的・システムの課題解決に

において目指すべき方向性は、製造業の生産管理やFA（Factory Automation）、FMS（Flexible Manufacturing System）の構築と論点を同じくしているといつてよい。当該解釈を基点にすれば、製造業の次世代工場として期待される「つながる工場」や「スマート工場」の議論にみる経済産業省が打ち出した Connected Industries の方向性と、建設業の i-Construction 推進を背景に発展する情報化施工・自動化施工・無人化施工のありようは、ともに自律分散制御型の生産システム構築を課題、ターゲットにしているといえる³⁾。DX（Digital Transformation）をキーワードに産業革新を目指す潮流は、建設業と製造業でますます自律分散制御型生産システム指向の傾向を強めていると筆者は考えている。建設業では、建設DX、インフラDXの文脈において、自律分散制御技術高度化に立脚する建設生産プロセスの再構築や新たなビジネスモデル構築に脚光が当たっている⁴⁾。5GやAIの活用を視野に入れた展開も加速度的に進んでおり、デジタル実装を前提とする施工を当たり前とする発想が業界に定着しつつあるといえる。こうした動向を背景に、本稿が狙いとする論点は下記の通りである。

本稿では、「建設業と製造業は『変種・多様性生産のFA化』を接点に生産システム革新の共創が可能である」ことの試論的提示を試みる。本稿の考察対象は土木構造物（道路橋や防波堤など）の工事を担う建設業／分野であり、建築業／分野は対象外とする。また、i-Constructionは測量、施工、維持管理などの建設プロセス全体の生産性向上施策であるが、論点を焦点化することからも施工にフォーカスし、測量や維持管理の動向やコンクリート工の規格標準化、施工時期の問題は本考察から捨象する。

i-Constructionの基軸である建設現場へのICT実装は生産性向上の強力な手段であることは間違いないが、施工条件の常態的可変性が強いいため、指向される施工の全自動化や自律制御型ロボット導入のハードルは高く、施工の効率性・合理性において無人化や省人化には限界があるといつてよい。そのため、ヒト（人力）作業のありよう、ヒトの役割にも目を向けたデジタル技術活用の生産システム思想が求められてくる。生産性向上施策を省人化効果に求める偏重的な工数削減発想では、i-Constructionの取り組みは人力施工回避や建設機械高度化によるヒト作業の機械作業化論に過ぎなくなる。つまり、ICT実装推進において、生産技術的要素と人的要素で構成される建設生産システムを効果的に運用する生産管理・現場管理のありようが問われてくることになる。

現場の変動性が高ければ高いほど、オペレーション上の問題は多発する。生産トラブルや状況変化、不確実性への対応・問題解決は作業者の知的熟練度に左右される。直接工数の作業領域が機械化・自動化されればされるほど、ますます問われるのはヒトの役割であり、また、その知的熟練度のありようである。人手不足を背景に省人化を志向すればするほど、現場の安定的オペレーションにとって不可欠である変化・不確実性対応のありようが問われることになる。この論点は建設業であれ、製造業であれ、共通であるといえる。

現場環境の変動が常態的である建設業において、作業の標準化や自動化導入のハードルは高い。しかしながら、こうした生産性向上の制約条件が高い同現場の取り組みから新たな生産シ

システム革新の視点・発想が生まれてくる可能性がある。ICT・デジタル技術武装が多くの産業で加速度的に進む中、高い変動性の中で生産性向上に取り組む建設業のありようから、例えば製造業における新たなマン・マシンのシステム化や生産のフレキシビリティに関する知見を見出すことができる、と筆者は考えている。建機による繰り返し作業や定型的な作業の自動化によって、製造業の量産オペレーション的なシステム、つまり「建設現場の工場化」が目指される一方で、本邦建設業が蓄積してきた生産システムの強みは、常態的可変性に対する柔軟な対応力、フレキシビリティの高さである。デジタル技術が進歩し、その実装が進んだとして、作業環境の一過性や自然依存性等にみる施工現場の変動性は変わらない。自律分散制御型の自動化施工による建設生産システム革新に向けた論点は、フレキシビリティの高さをどのようにデジタル実装によって活かすことができるか、にあるとよい。この建設生産システム革新のターゲットは、自動化された多品種・多仕様・小ロット生産システムを目指してきた製造業のFA、FMSと同じ方向性にあるといってもよいだろう。

デジタル技術を活用した生産システムの革新や現場能力構築に関する知見、また、論点を両業界で横断的に相互利用する方向性も、今後のありようとして考えられる⁵⁾。特に、建設業と製造業の両者による「付加価値生産性」の向上に向けた生産技術的視点と生産／現場管理的視点の両アプローチをもとに、異業種融合的協働や集合知から自律分散制御型生産システムの新たな類型が見いだせるかもしれない。本稿は、建設業で進むデジタル実装のありようから、その論点についてフレキシビリティを一つの切り口に試論を展開する。

本稿は、建設業における自律制御と自律分散制御を次のように使い分けている。自律分散制御は、建設生産システムを構成する建設機械・ロボット等の個々のサブシステムを制御しつつも、それらが自律的かつ協調的な行動をとり全体最適を実現するひとつのシステムとして機能することとする。自律制御とは個々のサブシステム単位でそれぞれが自律的に行動することとする。このように、最適化の処理をサブシステム単位に分散させる自律制御型システムで構成され、その上位レイヤーのシステム全体での全体最適化を図る生産システムを、自律分散制御型生産システムと呼ぶ。

本稿の構成は、以下である。最初に、本邦の建設業における労働事情と社会インフラ整備のありようを概観する。次に、建設業のデジタル技術実装と生産性向上の動向を捉え、フレキシビリティにフォーカスを当てることで、建設生産システム革新の論点を整理していく。最後に、建設業と製造業による集合知的な自律分散制御型システム確立の共創領域の設定について言及する。

2. 建設業の人手不足問題

2-1. 建設就業者数の減少と高齢化

日本国内の多くの産業で、少子・高齢化・人口減に対応する新たな事業展開が模索されはじ

単位：万人（人口）、%（構成比）

		平成30年10月1日		
		総数	男	女
人口 (万人)	総人口	12,644	6,153 (性比) 94.8	6,491
	65歳以上人口	3,558	1,546 (性比) 76.8	2,012
	65～74歳人口	1,760	840 (性比) 91.3	920
	75歳以上人口	1,798	706 (性比) 64.6	1,092
	15～64歳人口	7,545	3,818 (性比) 102.4	3,727
	15歳未満人口	1,542	789 (性比) 104.9	752
構成比	総人口	100.0	100.0	100.0
	65歳以上人口（高齢化率）	28.1	25.1	31.0
	65～74歳人口	13.9	13.7	14.2
	75歳以上人口	14.2	11.5	16.8
	15～64歳人口	59.7	62.1	57.4
	15歳未満人口	12.2	12.8	11.6

資料：総務省「人口推計」平成30年10月1日（確定値）
 (注)「性比」は、女性人口100人に対する男性人口
 出所) 内閣府 [2019], 2 ページ。

図1 高齢化の現状

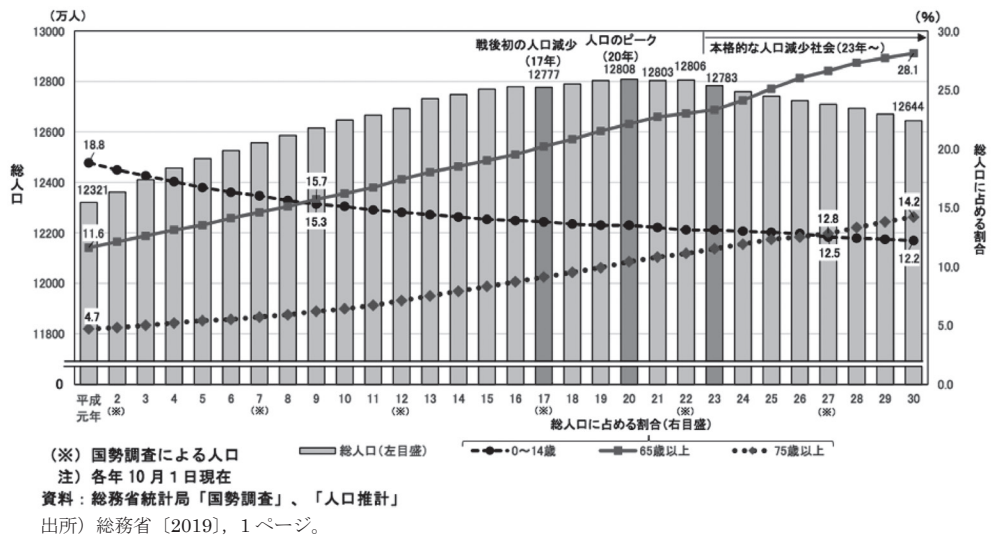


図2 平成30年間の総人口の推移

めている。図1は令和元年版の『高齢社会白書』から借用した高齢化の現状である。2018年10月段階で総人口は1億2644万人、65歳以上が総人口に占める割合（高齢化率）は28.1%となっている。総務省が公表している「報道資料 統計トピックス」では、1989年から2018年に至る30年間の人口動態を「人口減少社会、少子高齢化」、「団塊の世代が70歳に」「未婚率が上昇」「東京圏への転入超過続く」の4項目で端的にまとめている⁶⁾。また、そこでは図2にある総人口の推移から、2011年以降の一貫した人口減少をもって、現状を本格的な人口減少社会に位置づけている。

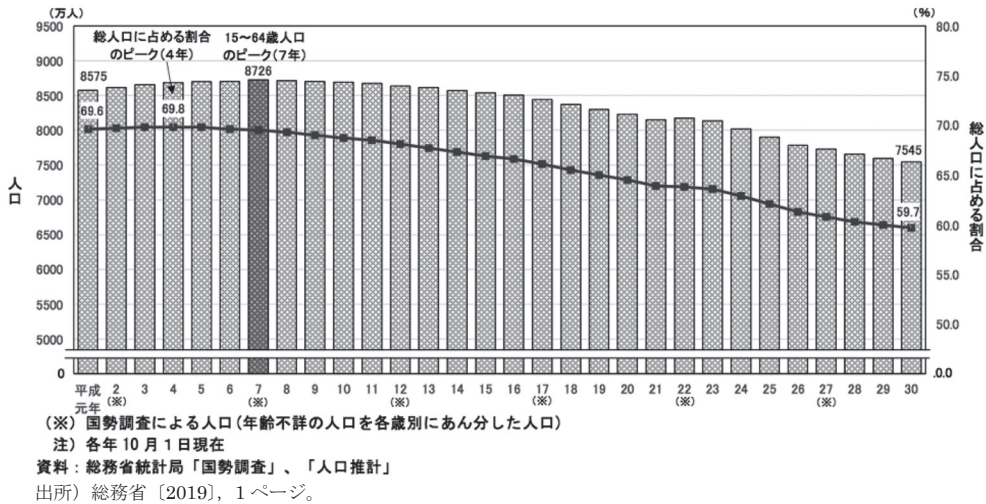


図3 平成30年間の生産年齢人口比率の推移

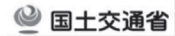
人口減少の中で、昨今の産業界が問題とする課題が、生産年齢人口のありようである。図3は既出「報道資料 統計トピックス」から引用した「15歳～64歳人口及び総人口に占める割合の推移」を示したものである。生産年齢人口比率は1992年をピークに下がっていることがわかる。2018年の生産年齢人口総数は7545万人で、総人口に占める割合（生産年齢人口比率）は59.7%と6割を下回る状況になっている。同トピックスでは、2018年時点の同比率が比較可能な1950年以降の間で最も低い結果になっていることが指摘されている。生産年齢人口の減少は、産業界の国内労働力確保問題を招くことになる。

生産年齢人口減少が続く中で、建設業の就業動向は際立って深刻さを増している。製造業では国内の労働力確保が困難になれば、海外生産移管など国外でのオペレーションも選択肢となる。実際、1990年代以降製造業では大量労働力・低賃金を求めて、中国への生産移管が相次いだ。他方、社会インフラを主たる対象とする建設業では、製造業のようにオペレーションの労働力不足を海外生産移管によって解消することは不可能である。建設・施工対象を国外移管することは不可能であり、現地事情・条件の施工制約のもとで工事を進めることになる。

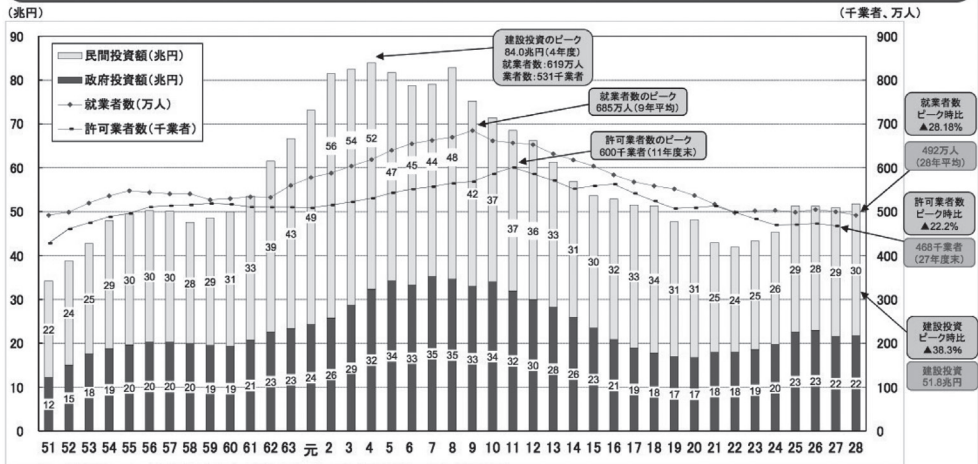
国土交通省の資料をもとに、建設業の就業状況の概観を捉えてみる。図4は建設投資・許可業者数及び就業者数の推移を示している。建設投資額の落ち込みに合わせて、建設業者数も減少し、同時に就業者数も下降線をたどっている。こうした建設業者数及び就業者数の減少の中で、労働編成においても建設業は大きな課題に直面している。図5は就業者の高齢化動向を示している。建設業は全産業に比して高い就業者の高齢化率にあり、また、2012年から2016年にかけて、29歳以下の人材の比率は10%～11%付近にある。つまり、就業者減少のトレンドは若手人材確保の困難さをも意味しているといえる。

図6にあるように、国土交通省では高齢作業員の大量離職の見通しに対する危惧を示している。高齢作業員の離職・引退によって、労働力不足の状況はさらに深刻化することになる。

建設投資、許可業者数及び就業者数の推移



- 建設投資額はピーク時の4年度: 約84兆円から22年度: 約41兆円まで落ち込んだが、その後、増加に転じ、28年度は約52兆円となる見通し(ピーク時から約38%減)。
- 建設業者数(27年度末)は約47万業者で、ピーク時(11年度末)から約22%減。
- 建設業就業者数(28年平均)は492万人で、ピーク時(9年平均)から約28%減。

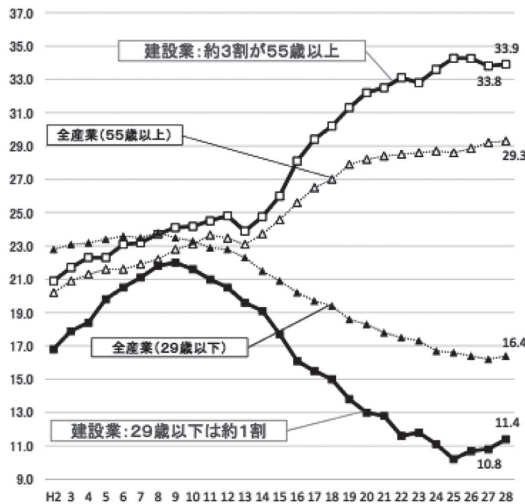


注1 投資額については平成25年度まで実績、26年度・27年度は見込み、28年度は見通し
 注2 許可業者数は各年度末(翌年3月末)の値
 注3 就業者数は年平均。平成23年は、被災3県(岩手県・宮城県・福島県)を補完推計した値について平成22年国勢調査結果を基準とする推計人口と差及推計した値
 出所) 国土交通省建設産業政策会議 [2017], 4 ページ。

図4 建設業を取り巻く状況

建設業就業者の高齢化の進行

- 建設業就業者は、55歳以上が約34%、29歳以下が約11%と高齢化が進行し、次世代への技術継承が大きな課題。
 ※実数ベースでは、建設業就業者数のうち平成27年と比較して55歳以上が約2万人減少、29歳以下は約2万人増加。



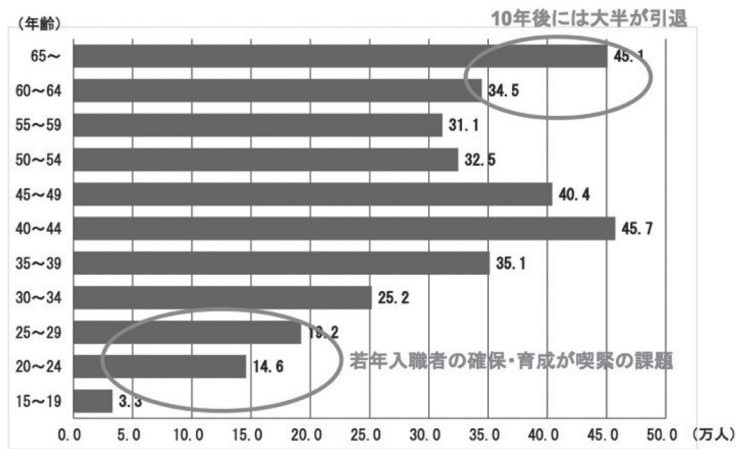
出典: 総務省「労働力調査」を基に国土交通省で算出
 出所) 国土交通省建設産業政策会議 [2017], 15 ページ。

図5 建設業就業者の高齢化トレンド

このように就業者の高い高齢化率と先述した若手人材確保の困難さが従来以上の労働力不足を招き、結果として建設業の施工能力に大きな影響を与えることになる。図6では高齢作業員引退の穴を埋める若手人材確保・育成が建設業の喫緊課題として取り上げられているが、図4にあるように建設投資額が1992年の84兆円をピークに減少傾向にあり、当該数値から同業界の飛躍的な成長を想定することは難しく、若い人材にとって魅力ある就業先としては映りにくい。

都市圏に比して高齢化・人口減が進む地方圏での労働力確保問題の諸相は今後ますます厳しくなってくると推察できる。建設業での労働力不足への懸念や雇用の不安定さ、また省力化はか

担い手確保の必要性:建設業における高齢者の大量離職の見通し 国土交通省



出典: 総務省「労働力調査」(2016年平均)を元に国土交通省で算出

出所) 国土交通省建設産業政策会議 [2017], 16 ページ。

図6 高齢就業者の引退見通し

ねてより議論されていた論点である (日刊建設工業新聞社編集 [1996])。省力化および機械化工法の研究開発と実用化が進められてきた一方で、図4にあるように、1992年をピークとする建設投資額において、「バブル経済崩壊後の投資減少局面では、建設投資が建設労働者の減少をさらに上回って、ほぼ一貫して労働力過剰となったため、省力化につながる建設現場の生産性向上が見送られてきた」⁷⁾ 経緯がある。しかしながら、2020年代前半の実態において、新規就業者の増加によって労働力不足を解消する決定的な好材料を建設業で見出すことは難しいといえる。

建設業は元請・下請構造を取ることが一般的であり、地方の建設工事は地方に本拠を構え活動する業者が施工を請け負うケースが多い。大手・準大手ゼネコン等が元請として受注した案件を、下請契約により現場立地エリアの地元中小業者が施工することになる。元請は施工全体の監督業務・外注管理を担い、地元業者は直接現場施工を担う分業構造により、土木構造物が生産される。地方圏の人手不足問題は、社会インフラの直接施工を担う地方中小建設業者の施工能力を左右する。業界全体の就業者問題、そして地方圏の人手不足問題が深刻さを増し、地方創生、また、分散型社会のありようが問われる時代性において、地域社会生活の基盤である社会インフラ整備を担う建設業の生産性向上への期待は、ますます大きくなっている。

2-2. 社会インフラ整備への懸念

建設業の就業者数の減少及び高い高齢化率は、社会インフラの整備・維持・更新を困難とする大きな制約条件になっている。本稿でいう社会インフラとは、社会共用の施設 (固定資産) である「土地に定着した工作物」⁸⁾ を意味し、長期にわたって日常生活や経済活動を支える社会資本である。例えば、道路や港湾など交通施設、上下水道といった生活施設、河川や海岸の

防災施設などの土木構造物である。こうした公共性の高い社会基盤施設と呼ばれる土木構造物は長期使用が前提であり、老朽・劣化等のため、定期的な点検・管理、補修・メンテナンスによる維持管理が不可欠であり、改修・更新工事が実施される（中村〔2017〕）。特に、社会インフラの適切な維持管理が損なわれると、事故発生リスクが高まることになる。

国内では過去に整備した社会インフラの老朽化対策が大きな社会課題となっている。図7は社会インフラの老朽化の現状を示したものである。建設後50年以上が経過した社会インフラの割合は、例えば道路橋では2018年段階の約25%から2033年には約63%と、15年で2倍以上のペースで増加する。こうした老朽化の状況から、物理的劣化による安全面、機能面確保が不十分となる工作物が今後増加することが想定されている。

2013年に国土交通省は「社会資本メンテナンス元年」として社会インフラの老朽化対策に大きく乗り出した。同省広報誌の記載が問題の所在をわかりやすく端的に示している。「中央自動車道笹子トンネル天井板落下事故のような痛ましい事故は二度と繰り返さないとの決意のもと、国土交通省では今後もインフラの老朽化対策の取り組みを推進」⁹⁾ するとし、同事故などを踏まえ、「高度経済成長期以降に整備したインフラが急速に老朽化し、建設後50年以上経過する施設の割合が加速度的に高くなる見込み」¹⁰⁾ を問題視している。

つまり、国内各地で一斉整備され、老朽化した社会インフラの維持・補修及び更新時期が今後集中することが想定されている。インフラの戦略的維持管理・更新等の方向性を示す「イン

	2018年3月	2023年3月	2033年3月
道路橋 [約73万橋 ^{注1)} (橋長2m以上の橋)]	約25%	約39%	約63%
トンネル [約1万1千本 ^{注2)}]	約20%	約27%	約42%
河川管理施設 (水門等) [約1万施設 ^{注3)}]	約32%	約42%	約62%
下水道管きよ [総延長：約47万km ^{注4)}]	約4%	約8%	約21%
港湾岸壁 [約5千施設 ^{注5)} (水深-4.5m以深)]	約17%	約32%	約58%

- 高度成長期以降に整備された道路橋、トンネル、河川、下水道、港湾等について、建設後50年以上経過する施設の割合が加速度的に高くなる。
 ※施設の老朽化の状況は、建設年度で一律に決まるのではなく、立地環境や維持管理の状況等によって異なるが、ここでは便宜的に建設後50年で整理。
- 《建設後50年以上経過する社会資本の割合》
- (注) 1 道路橋約73万橋のうち、建設年度不明橋梁の約23万橋については、割合の算出にあたり除いている。(2017年度集計)
 2 トンネル約1万1千本のうち、建設年度不明トンネルの約400本については、割合の算出にあたり除いている。(2017年度集計)
 3 国管理の施設のみ。建設年度が不明な約1,000施設を含む。(50年以内に整備された施設については概ね記録が存在していることから、建設年度が不明な施設は約50年以上経過した施設として整理している。)(2017年度集計)
 4 建設年度が不明な約2万kmを含む。(30年以内に布設された管きよについては概ね記録が存在していることから、建設年度が不明な施設は約30年以上経過した施設として整理し、記録が確認できる経過年数毎の整備延長割合により不明な施設の整備延長を按分し、計上している。)(2017年度集計)
 5 建設年度不明岸壁の約100施設については、割合の算出にあたり除いている。(2017年度集計)

資料) 国土交通省

出所) 国土交通省〔2019〕, 110ページ。

図7 社会インフラの老朽化

フラ長寿命化基本計画」が2013年にとりまとめられ、2014年に基本計画を受けたアクションプランとして「インフラ長寿命化計画」が立ち上がった。長寿命化計画では「昭和30年頃からは産業インフラ、昭和50年頃からは生活関連インフラについて集中的に進められるなど、時代の要請に応じた対応がなされてきた。その結果、整備時期は施設によってバラツキが見られ、管理主体も国、地方公共団体、民間企業等様々である。また、その管理形態も、施設に不具合が生じてから修繕を行う『事後保全』、定期的に交換・更新を行う『時間計画保全』、劣化・損傷等の状態に応じて修繕・更新を行う『状態監視保全』等、施設の特성에依りて様々である。これらを背景に、維持管理・更新等に係る取組状況も、施設毎、管理者毎に異なる状況にあり、本来、同じ対応が求められる施設であっても、メンテナンスサイクルのあらゆる段階で大きな差異が生じている」¹¹⁾ ことが指摘されている。

先述のように就業者の高齢化と若手不足が深刻化し、減災・防災工事を含め、インフラの維持管理・更新が困難な状況を迎えている。建設現場は資材発注や建機スケジュール、人員配置が工期末を起点に組まれており、小さな乱れや遅延が建設コスト・品質・安全性に大きな影響を及ぼすシステム工事が主流となっている。深刻な人手不足は工期に合わせた施工を難しくする。

以上の簡単な建設分野現状の素描からもわかるように、人材不足問題と時期集中的な老朽化問題は従来の建設業の施工立脚基盤を不安定化させることになっている。

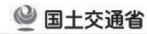
3. i-Construction の推進

3-1. i-Construction

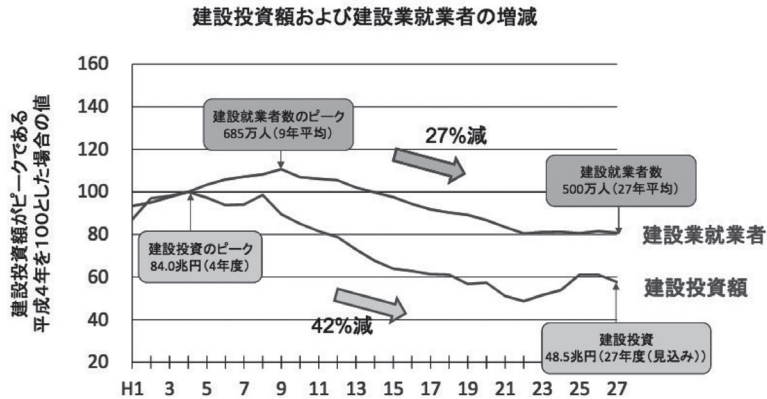
人材不足問題と集中的な社会インフラ老朽化問題に直面する建設業は、過去、労働力過剰を背景に生産性向上を見送ってきたとの反省があるとみてよい(図8)。2016年度において「まだ55歳以上の方々が建設現場を支えることによって我が国の建設現場は成り立っているが、この方々の大部分が離職することが予想される10年後には、現在と同水準の生産性では建設現場は成り立たない」¹²⁾ ことが指摘されている。こうした状況に対する解決施策として、国土交通省はICTを活用した建設生産システムを中心とする産業革新に向けて「i-Construction」のコンセプトを打ち出した。i-Constructionとは「ICTの全面的な活用(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、もって魅力ある建設現場を目指す取組」¹³⁾ とされる。i-Constructionの主たるターゲットは施工現場の生産性向上にあるが、その取り組みの中で工事日数短縮や安全性向上による「3K」解消を目指し、就業先としての魅力化を図り、選ばれる業種への変貌が掲げられている

本考察は施工にフォーカスを絞っているが、以下では生産性向上及び業種としての魅力化をターゲットとするi-Constructionの施策の基軸を確認しておく。i-Constructionは、その推進を目的にトップランナー施策として「ICTの全面的な活用(ICT土工)」、「全体最適の導入(コ

1(1). 労働力過剰を背景とした生産性の低迷



○ バブル崩壊後の投資の減少局面では、建設投資が労働者の減少をさらに上回って、ほぼ一貫して労働力過剰となり、省力化につながる建設現場の生産性向上が見送られてきた。



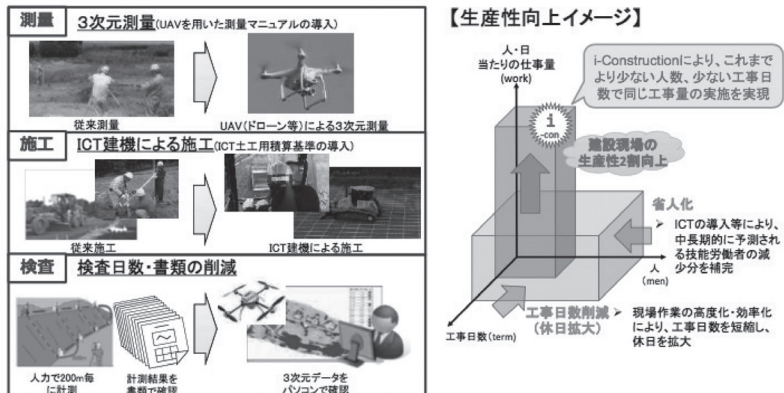
出所) 国土交通省 i-Construction 委員会 [2016 b], 2 ページ。

図 8 建設業の生産性低迷

i-Construction ～建設業の生産性向上～



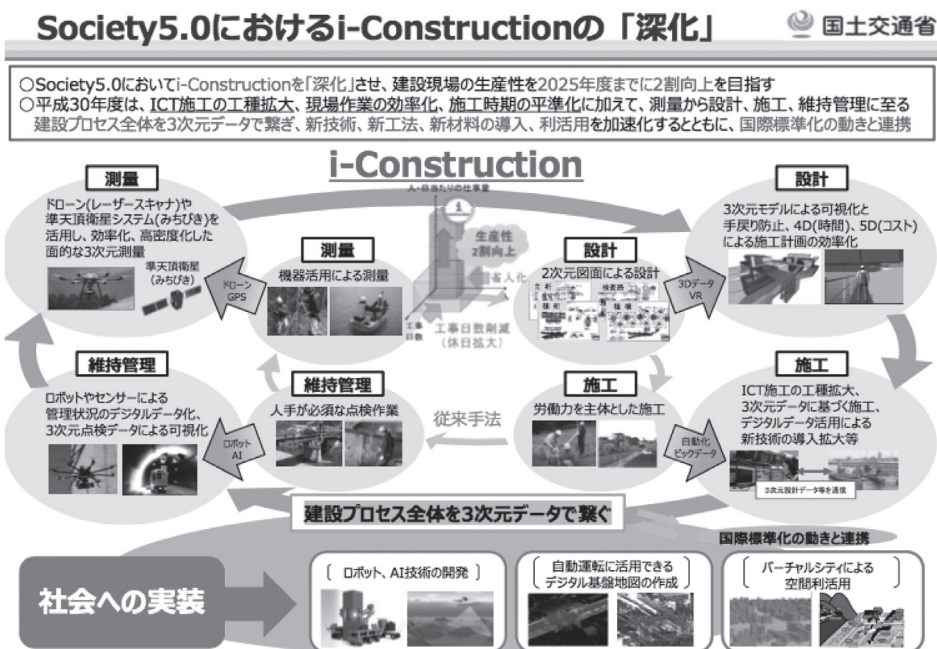
- 建設業は社会資本の整備の担い手であると同時に、社会の安全・安心の確保を担う、我が国の国土保全上必要不可欠な「地域の守り手」。
- 人口減少や高齢化が進む中にも、これらの役割を果たすため、建設業の賃金水準の向上や休日の拡大等による働き方改革とともに、生産性向上が必要不可欠。
- 国土交通省では、調査・測量から設計、施工、検査、維持管理・更新までの全ての建設生産プロセスでICT等を活用する「i-Construction」を推進し、建設現場の生産性を、2025年度までに2割向上を目指す。



出所) 国土交通省 i-Construction 推進コンソーシアム企画委員会 [2016], 1 ページ。

図 9 i-Construction による生産性向上のターゲット

ンクリート工の規格の標準化等)、「施工時期の平準化」からスタートしている。その目指すところは図9で「生産向上イメージ」として描かれているように、測量から検査、維持管理・更新までの建設生産プロセス全体で、工事日数短縮と省人化による労働投入量の削減によって生産性を2025年までに2割向上させることにある¹⁴⁾。また、i-Constructionは図10にあるように、建設生産プロセス全体での生産性向上を目指し、「プロセス全体を3次元データで繋ぐ」



出所) 国土交通省 i-Construction 推進コンソーシアム企画委員会 [2018 a], 1 ページ。

図 10 i-Construction によるデジタルデータ活用のさらなる推進

ことが明示されている。

当該取り組みは 2015 年に設置された i-Construction 委員会の議論を経て、その後 2017 年に i-Construction 推進コンソーシアムが立ち上げられ、産学官による推進体制が整備された¹⁵⁾。同コンソーシアム設置は、革新的な技術導入促進を強く意識した異分野連携の促進が背景にある(橋本 [2018])。

3-2. 情報化施工

建設業ではそれ以前から建設生産システムへの ICT 実装は進められていた。その代表的なシステムが「情報化施工」である。情報化施工とは、建設情報として土や岩、環境のデータを利活用することで建設プロセスの効率化・合理化を実現し、コスト低減や品質向上を目指すものであり、2000 年代当初は「情報化技術を建設生産に適用して、施工に関する情報の効率的利用を図ることにより、施工の効率性・安全性・品質の向上、環境保全等に関する施工の合理化を図る生産システム」¹⁶⁾として定義された。ICT 技術が進歩した 2020 年代においては、多様な技術領域にアクセスし、システムとしての拡張幅を広げる、「最新の ICT を道路、ダム、建築などの施工現場に導入することにより施工効率の改善、構造物の品質向上、施工に伴う環境負荷の低減などをはかる技術の総称」¹⁷⁾と定義するほうが現状にマッチしているといえる¹⁸⁾。

情報化施工の技術的系譜と知識・ノウハウは、i-Construction に継承されている。情報化施工は i-Construction コンセプトにおいて、建設プロセスにおける System of Systems のコアとなる

技術体系の一つとして位置づけられているとあってよい。

情報化施工は2000年以降の建設現場を支える基軸として、積極的な研究開発が展開され、また一般化が推進されてきた¹⁹⁾。2008年に、情報化施工は国土交通省による推進戦略として「建設事業の調査、設計、施工、監督・検査、維持管理という建設生産プロセスのうち「施工」に注目して、ICTの活用により各プロセスから得られる電子情報を活用して高効率・高精度な施工を実現し、さらに施工で得られる電子情報を他のプロセスに活用することによって、建設生産プロセス全体における生産性の向上や品質の確保を図ることを目的としたシステム」²⁰⁾であるとし、「情報化施工で目指しているICTを利用した機械制御や計測、ならびに技術者判断の高度化は建設イノベーションと呼ぶに値する革新であり、これまでの建設施工のイメージを画期的に変え得る可能性」²¹⁾が期待されていた。

i-Construction以降、「情報化施工」の視野が建設生産プロセス全体に向けられることになったが、その立脚基盤は従前からの積極的な情報化施工の一般化と実用化、ICT実装による生産性向上が推進されてきたことすでに形成されていたとあってよい²²⁾。2015年以降、建設業におけるICT活用はi-Constructionコンセプトのもとで加速化することになるが、そこには情報化施工の思想的ターゲットが継承されている。呼称から「施工」が外れ、「Construction」が使われることにより情報化施工で狙った建設生産プロセス全体でのICT活用の方向性が、より鮮明になったといえる。

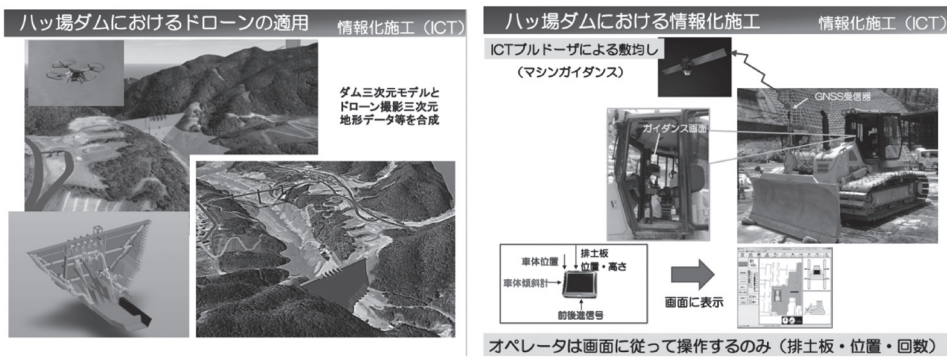
ICT実装のありようを建機から見てみよう。例えば、作業支援機能であるMC（Machine Control）やMG（Machine Guidance）が搭載された油圧ショベルやブルドーザなどの建機や遠隔操作による無人化施工などがi-Construction提唱以前から現場投入され、施工の効率化が図られてきた（建山・横山〔2016〕、建山〔2019 a〕）²³⁾。建機以外では現場情報を収集して作業状況を共有、把握するシステムの活用による判断業務の高度化も実践されてきた（建山〔2010〕）。こうした施工領域のICT活用は「ICT施工」「ICT土工」としてi-Constructionコンセプトに納められているが、その技術的系譜は情報化施工推進戦略時代から続いているものであり、その展開にみる建機へのICT実装や現場投入の成果は、2016年以降から加速化する建設生産システム革新のトリガーになったといえる。

ドローンやセンシング、レーザースキャン、画像処理、CIM（Construction Information Modeling）など多様なデジタル技術の進歩により、測量や維持管理との連動容易性が情報化施工にみる建機へのICT実装実績と呼応したことにより、図10にみる3次元データ共有による建設生産プロセス全体の生産性向上を図る仕組み作りの土台が形成されたといえる²⁴⁾。吉国〔1982〕は情報化施工について「現場情報の指数化は現場状況の定量的把握を容易にするであろうし、土技術者のコミュニケーション（原文ママ）を容易にするに違いない。この今目的要求に応えるかのように、最近急速に土に関する計測器が整備され、計測技術もともに向上した……この向上した計測技術は電子計算機と結びついてデータ（原文ママ）処理の省力化と即時性を増し、一つの施工管理システムとして成長し定着しよう」²⁵⁾としており、「地盤調査・土質試

験など事前の現場情報の収集から施工段階の現場情報の収集まで一貫したものになる時、情報化施工は理想の姿になる」²⁶⁾と述べる。当該見解は1982年のものであるが、i-Constructionにみる情報活用の論点はこの当時とほとんど変わっておらず、その問題意識が現代まで承継されているといえる。デジタル技術の発展と利便性が現代的な情報化施工の立脚基盤確立を可能としたことで、情報化施工の守備範囲が施工や工種を超えて建設プロセス全体に広がり、「生産システム」の効率化・合理化に向けた業界全体での課題解決活動に結びついている。

すでにICTの活用やi-Constructionコンセプトの積極的導入は大手ゼネコンでも進んでいる。例えば、図11は清水建設がハッ場ダム施工で実施するi-Constructionの取り組みである。ドローン撮影の3D画像と岩盤スケッチの合成によるダム基礎部分の岩盤情報の高度化などを実施、MG機能をもったICT建機による測量・指示要員の省力化と作業支援などが行われている。

i-Constructionは清水建設のような大手ゼネコンと違い、ICT実装において予算的・人的問題が制約条件となる中小業者への導入が懸念されているが、地方圏の地場建設業者によっては積極的に情報化施工、i-Constructionの取り組み会社も出てきている。例えば、北海道留萌市の堀口組は「Visual-Construction」(以下、V-Construction)と称される、現場施工のデジタル映像記録を活用する仕組みなど、独自のICT活用で生産性向上を試みている(西川他[2019]、



出所) 清水建設提供資料。

図 11 清水建設 i-Construction の取り組み



出所) 筆者撮影: 撮影協力 堀口組, 2019年10月

図 12 堀口組(北海道)による Visual-Construction の現場実証実験

湯浅他〔2020〕)。V-Constructionは現場施工のタイムラプス映像によるデータベース化、現場状況をリアルタイムで把握できる遠隔モニタリング、映像データを活用した人材育成教材製作などの機能を持つ。図12は、堀口組によるV-Construction実証実験の風景である。

また、図13は関西圏にある堤防整備現場に設置されているi-Construction工事を示す「のぼり」であり、元請・下請ともに現場近隣の業者である²⁷⁾。公告工事による積極的な普及展開と工種拡大により、図14にあるようにICT活用工事件数も増加傾向にある。また、今後の推進には地方中小業者への普及が不可欠であり、図15のように負担が大きくなる中小業者支援策も検討されている²⁸⁾。



出所) 筆者撮影：2019年8月

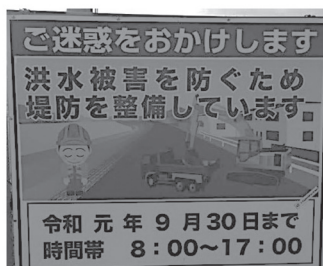


図13 関西地方圏にあるi-Construction工事を示す「のぼり」の例

以上のように、情報化施工での蓄積がi-Constructionにみるデジタル技術実装の土台を形作り、またV-Constructionコンセプトのような新たな展開を産み出す土壌として機能している。情報化施工の生産思想は、遠隔操作による無人化施工のさらなる発展、また、建機の自律化・自動化、建設DX、インフラDXの文脈へと承継されていくことになる。

ICT活用工事の実施状況



- H30年度は、直轄工事におけるICT活用工事の公告件数1,948件のうち約6割の1,105件で実施。
- 都道府県・政令市におけるICT土工の公告件数が2,428件、実施件数は523件に大幅に増加。

ICT施工実施状況

単位:件

工種	平成28年度		平成29年度		平成30年度	
	公告件数	うちICT実施	公告件数	うちICT実施	公告件数	うちICT実施
土工	1,625	584	1,952	815	1,675	960
舗装工	—	—	201	79	203	80
浚渫工	—	—	28	24	62	57
浚渫工(河川)	—	—	—	—	8	8
合計	1,625	584	2,181	918	1,948	1,105
実施率	36%		42%		57%	

都道府県・政令市におけるICT施工実施状況

単位:件

	平成28年度		平成29年度		平成30年度	
	ICT実施件数	公告件数	うちICT実施	公告件数	うちICT実施	
土工	84	870	291	2,428	523	
実施率	33%		22%			

出所) 国土交通省 ICT 導入協議会〔2019〕, 1ページ。

図14 ICT活用工事の実施件数動向

1: 中小企業への支援策(案)



- i-Constructionを推進するためには、中小企業への展開が不可欠であり、中小企業において負担が大きい、ICTの導入や人材育成等への支援が必要
- 中小企業がICT施工を実施しやすい環境を構築するため、企業のICT実施状況を踏まえつつ、支援策を順次展開

① 小規模土工等の実態を踏まえた積算へ改善

- ・中小企業がICTを活用しやすい環境を整備
- ・ICT施工の実態を調査し、小規模施工をはじめ実態を踏まえた積算が可能となるよう、ICT建機の利用割合を現場に応じて設定できる積算に改善（従来、掘削工におけるICT建機の利用割合は25%で一律）



② ニーズに沿った3次元設計データの提供等

- ・地方整備局技術事務所等によるサポート体制の充実と3次元データの提供等の支援等

(支援イメージ例)

	3次元測量・設計データ作成	ICT施工
従来	施工業者(外注含む)	施工業者
今回	地方整備局等 データ提供	未経験企業等

③ ICTに関する研修の充実等

- ・3次元データの作成実習等の充実
- ・“専任”の明確化の再周知による、監理技術者等のICTに関する研修への参加しやすい環境づくり

④ 地方公共団体への支援

- ・モデル事業における補助金等の活用

出所) 国土交通省 ICT 導入協議会 [2018], 1 ページ。

図 15 中小業者への支援検討案

3-3. 無人化施工の発展と自動化施工指向

日本国内において、ドイツ発の Industry 4.0 コンセプトを皮切りに製造業で加速度的に IoT や CPS (Cyber-Physical System), AI を活用した「つながる工場」「考える工場」の話題性が高まっている。1980 年代以降、3D-CAD (3 Dimension Computer Aided Design), CAM (Computer Aided Manufacturing), CAE (Computer Aided Engineering), PDM (Product Data Management) など日本製造業はデジタル技術導入に積極的に取り組んできたが、2010 年代に入り、進化するセンシング技術や ICT, CPS, AI, 3D プリンター, 協調ロボットなどのデジタル技術を改めて活用する新たなフェーズに向かいつつある。

こうした製造業におけるデジタル技術導入のありようが情報化施工や i-Construction の推進において意識され、建設生産システム革新のベンチマークになっているとあってよい。建設業では、情報化施工推進戦略や i-Construction 委員会の報告書からも製造業との比較の中で現状を評価する傾向が見て取れ、i-Construction が掲げる建設現場の「最先端の工場化」はその現れの一つといえる。例えば、「情報化施工推進戦略 (本文)」では、製造業を生産システムの合理化が進んでいるとし、「2000 年代に普及した位置特定技術、移動体制御技術、情報通信技術等のコア技術を統合した情報化施工技術によって、建設業は、製造業の大量生産時代のレベルに達したといえる。情報化施工技術は、製造業における技術革新のノウハウを応用し、装置のダウンサイジングや生産システムの最適化、コンカレントエンジニアリングなどに発展してい

くものと期待する」²⁹⁾とあり、建機のMGやMC機能は製造業の数値制御技術（NC加工等）の土木施工分野への応用に位置づけられている。積極的な技術導入により生産性向上を図る製造業の取り組みが、2000年代以降の建設業に大きな刺激になっていたといえる。

製造業との比較から建設生産システムのありようを産業競争力懇談会の2015年度プロジェクト最終報告書が特徴づけている（産業競争力懇談会〔2016〕）。建設業の特徴を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労働集約性に整理し、これらから製造業にみる生産性向上策が適用しにくい業種として論じている（図16）。この報告書では、従来型のICT活用では製造業のような生産性向上施策の実施は困難であるが、ICTの進歩によってその有用性・適用可能性が高まっているとし、製造業との違いを整理した上で、建設現場革新のビジョンを「スマート建設生産システム」として提示している。スマート建設生産システムとは「建設データ基盤としてのBIM/CIMと近年のロボット・自動化、3次元計測／測位、ネットワーク、デバイス、ビッグデータ解析、人工知能のICTを連携させた革新的なシステム」³⁰⁾とされる。

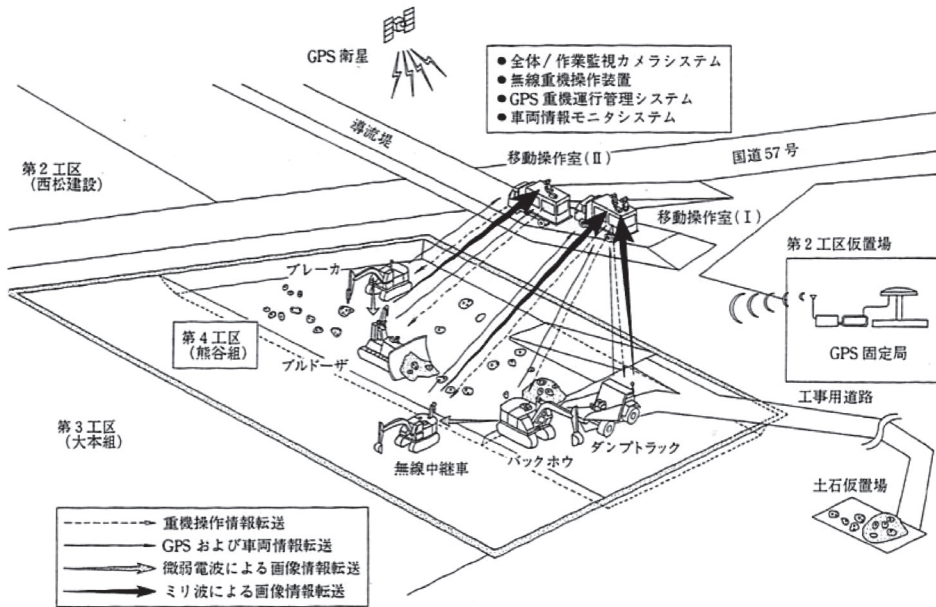
- | | |
|--|---|
| <p>(1) 非量産性</p> <ul style="list-style-type: none"> ・それぞれ異なる土地で、顧客の注文に基づき、一品ごとに異なる形状の構造物を構築する。(属地生産、注文生産、一品生産) <p>(2) 自然依存性</p> <ul style="list-style-type: none"> ・雨や風、気温、降雪といった天候条件や、地中、水中などの自然条件を相手としながらの作業である。また、これらへの対応には人の経験によるノウハウを多く必要とする。 <p>(3) 作業環境の一過性</p> <ul style="list-style-type: none"> ・作業環境自体が変化し、高所や開口部、重機、搬送機械との近接部位が随時発生するため、働く人に危険を及ぼす環境が多い。 ・机上での検討をもとに実地で作りながら検証し、場合によっては作り直しも発生するなど、いわば、新たな試作品をその都度生産しているといえる。 | <p>(4) 社会環境依存性</p> <ul style="list-style-type: none"> ・プロジェクト工期が長いいため、社会環境や顧客の経済状況の変化等によるプロジェクトの計画変更、中断も多い。 <p>(5) 複合専門性</p> <ul style="list-style-type: none"> ・各業務が専門性を持ち、細分化された分業制であるため、多くの専門業者が存在する。 ・プロジェクトの規模や工期、建設場所等によって投入資源を柔軟に調整するため、重層下請け構造になりやすい。 <p>(6) 労働集約性</p> <ul style="list-style-type: none"> ・巨大な構造物を構築するがゆえに、現地ですしつづ成形しながら構築する作業が多く、手作業も多い。 ・その都度出来上がりの形（出来形）を確認しながら進むことによる人的なすり合わせや、成型取付後の寸法、品質のばらつきへの対応を要する。 |
|--|---|

出所) 産業競争力懇談会〔2016〕、5~6ページ。

図16 産業競争力懇談会プロジェクトによる建設業の特徴まとめ

ロボット・自動化に目を向ければ、建設業における施工の自動化技術実装は、上述にある建設業固有の制約条件が大きな壁となっている。そうではあるが、過去から建設業は積極的に施工自動化に取り組んでおり、現在ではデジタル技術やICTの進歩と実装の容易性が施工への自動化導入の動きを加速させるトリガーになっている。こうした施工自動化への技術的土壌は、情報化施工とともに発展してきている遠隔操作による無人化施工によって豊富になっている。

遠隔操作による無人化施工は建機等の運転・作業の自律型の自動化ではなく、遠隔地でオペレータによる有人操作で実施され、災害復旧現場の二次被害防止などの観点から研究開発が進められてきた。無人化施工が実施された代表的成果として、雲仙・普賢岳の災害普及工事があつた。同現場は試験フィールド制度の最初の事例であり、RC（Radio Control）による無線操縦建機、監視カメラを使った画像システム、GPS（Global Positioning System）を使った運行管理システムなどを統合した遠隔操作による無人化施工が実行された。遠隔操作技術自体は雲仙・普賢岳復旧工事以前にも個別作業での導入事例があつたわけだが、複数の建機による各作業の



出所) 菅野他 [1994], 18 ページ。

図 17 雲仙・普賢岳における無人化施工の概要

連携を遠隔操作で実施するのは当該現場が初めてであった(菅野他 [1994])³¹⁾。1990 年代の雲仙・普賢岳復旧にみる当該無人化施工の概要を図 17, 遠隔操作実施風景の写真例を図 18 で示している。技術発展と積極的な要素技術開発により, 無人化施工はシステムの進化を続け, 図 19 にあるような世代区分としても整理されている(猪原 [2018])。

図 20 は 2021 年 8 月に開催されたレンタル業大手, 西尾レントオール主催「新しい建機展」(2021 年, 大阪市住之江区) で実施された無人化施工, 建機遠隔操作のデモンストレーション風景である。このように遠隔操作の施工システムがレンタル商品化されるなど, 無人化施工は特殊, 特定の建設現場から一般的な現場での活用, 実装へと本格的に移行しつつある。技術的にも, 5G を用いる遠隔操作と MG を組み合わせた「統合施工管理システム」の実証実験



出所) 日本建設機械化協会 [1994], 26-29 ページの差し込み写真。

図 18 雲仙・普賢岳における無人化施工風景例

大 別	映像伝送システムを用いた無人化施工			
施工方式	第1世代：直接操作方式	第2世代：モニター操作方式	第3世代：情報化施工方式	第4世代：ネットワーク型操作方式
概 要	オペレータが遠隔操作式建設機械を直接目視しながら遠隔操作する	オペレータがカメラが捉えた遠隔操作式建設機械の映像をモニターで見ながら遠隔操作する無人化施工	情報化施工に対応した通信方式を導入することで、通信範囲や伝送情報が拡張した次世代の主流となる無人化施工	
無人化施工システムの概要	●直接操作方式 オペレータが遠隔操作式建設機械を直接目視しながら遠隔操作する方式	●モニター操作方式(直接方式) 操作場所と遠隔操作式建設機械が直接、電波で通信する方式 ●モニター操作方式(中継方式) 操作場所と遠隔操作式建設機械が中継局を介して、電波で通信する方式	●情報化施工方式 GPS等による測位技術と設計値を合わせて出来形管理をしながら遠隔操作する。現場条件等に応じてモニター操作方式やネットワーク型操作方式と組み合わせて使用する場合がある	●ネットワーク型操作方式 モニター操作方式と同様にオペレータがカメラが捉えた遠隔操作式建設機械の映像をモニターで見ながら遠隔操作する無人化施工 建設機械の操作や映像の伝送に無線LANを使用し、広範囲での無人化施工に対応できる遠隔操作方式

出所) 猪原〔2018〕, 49 ページ。

図 19 無人化施工のシステムの世代区分



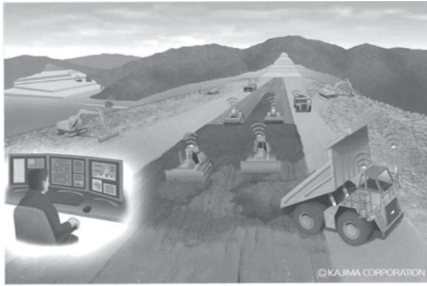
出所) 筆者撮影：撮影協力 西尾レントオール, 2021年8月

図 20 レンタル大手による無人化施工のデモンストレーション風景

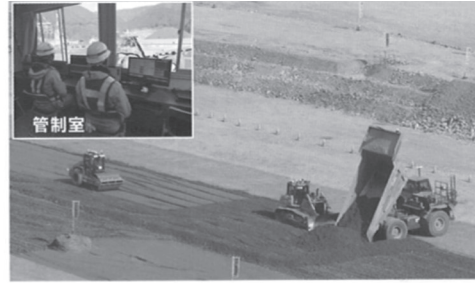
が実施されるなど、無人化施工はシステムとしてさらなる拡張を続けている（稲川・古屋〔2021〕）。

遠隔操作による無人化施工高度化の累加的な加速とともに、オペレータによる操作を不要とする無人化施工への取り組みも活発化している。例えば、片山〔2015〕にみる自律制御型割岩油圧ショベルのように、自律制御型建機の実験施工が進めている。このケースは自律制御型建機の単一繰り返し作業の実験として実施され、それら建機は大成建設「T-iROBO シリーズ」として開発されている。同社は当該建機シリーズをもとに、同社が「T-iCraft」と呼称している複数建機の協調運転制御方式の開発を展開している。

こうした複数建機による協調作業や、自動走行・作業運転（以下、本稿では自動走行と自動作業の組み合わせを「建機の自動運転」と呼ぶ）は、i-Construction にみるデジタル実装の基軸であり、そのターゲットが施工現場の「最新の工場化」である。自動運転、工場化への本稿脱稿時点（2021年）の先駆的なケースとして、例えば、鹿島建設のA⁴CSEL（以下、クアッドアクセル）がある。三浦〔2017〕にみるように、鹿島建設では自動運転機能を有した自律制御型自動建機と人が分担する次世代施工システムの研究開発が進められ、すでに実際の施工現場で適用されている³²⁾。クアッドアクセルは、プログラムに施工条件を入力し、決められた



ロックフィルダムでの A⁴CSEL 適用イメージ
出所) 三浦 [2021], 123 ページ。



ロックフィルダムでの A⁴CSEL の適用状況 (写真)

図 21 鹿島建設のクラウドアクセラ (次世代建設生産システム)

手順で建機を自動運転させる自律分散制御方式の施工システムである。図 21 は、クラウドアクセラの概要である (三浦 [2021])。つまり、オペレータによる遠隔操作型の無人化施工と違い、入力された作業データに基づいて建機の自動運転を行うわけである。この施工システムの開発当初は、そのターゲットは定型作業、繰り返し作業の自動化が目指され、自動化が難しい作業をヒト作業とすることで開発が進められた。こうした開発の進捗とともに、熟練技能者による現場の状況変化への対応力や問題発見・解決力を AI 手法等で「熟練性」として定量化、建機の動作を最適化する試みも進められている (三浦 [2021])。

大成建設 T-iCraft や鹿島建設クラウドアクセラのように、建設業の情報化施工および無人化施工の目指す到達点の一つが、建機の自律制御による自動運転化、自律分散制御型の施工システムの確立である。ゼネコン主導の開発とともに、建機メーカーは建機事業領域を拡大していく傾向にあり、建機メーカー主導による自律分散制御型の施工システム開発も進んでおり、積極的に建設プロセス全体へと視野を広げたシステム化のコンセプトを提起している。例えば、コマツのスマートコンストラクション、日立建機の ZCORE (自律型建設機械向けシステムプラットフォーム) である³³⁾。また、白久 [2021] や四家 [2021], 四家・村上 [2019] のように、建機の自動運転水準をレベル分けし、自律分散システムへの建機開発のステップも整理されはじめている。これら建機の自動運転を軸に施工プロセス全体をデジタル実装によって最適化しようとする建機メーカーの展開は、製造業にみる産業用ロボットのシステムインテグレータービジネスの様相と似通っているといってい良いだろう。

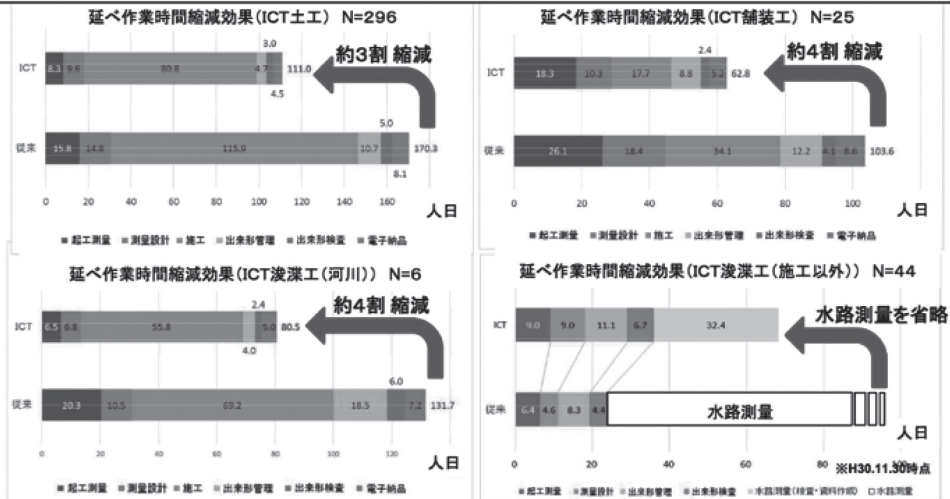
建設業では情報化施工の定着、実績が積み重ねられ、デジタル技術の発展と現場実装への動きが加速し、ゼネコン主導であれ、建機メーカー主導であれ、先述の「熟練性」の定量化への取り組みに代表されるように、多様な判断の機械化を実現することによる無人・自動化施工システムへの方向性が目指されているといっていよい。その流れは、建設現場の「工場化」の達成に向かっている。

図 22 にあるように、建設生産システム革新とデジタル技術の現場実装は、ICT 活用を基軸に、従来に比して延べ作業時間の縮減など、着実に成果が生まれつつある。しかしながら、前述のような建機の自動運転や自律制御などが開発途上にある一方、人力施工が必要な領域や場

ICT施工による延べ作業時間縮減効果（H30年度）



- ICT施工の対象となる起工測量から電子納品までの延べ作業時間について、土工では約3割、舗装工及び浚渫工(河川)では約4割の縮減効果がみられた。
 ○ 浚渫工ではICTによる出来形測量により、別途実施する水路測量の省略が可能となった。
 ※現場作業の変化により、工事全体で技術者等の業務がどう変化しているか、実態調査・分析が必要



※ 活用効果は施工者へのアンケート調査結果の平均値として算出。
 ※ 従来は労働者の想定値
 ※ 各作業が平行で行われる場合があるため、工事期間の削減率とは異なる。
 出所) 国土交通省 ICT 導入協議会〔2019〕, 4 ページ。

図 22 ICT 活用による作業時間縮減

面が完全になくなるわけではない。自律制御型建機の導入に加え、「現場の工場化」に向けて、それらを効果的に稼働させる施工方法や自動化できない領域の補完方法、現場状況の変化に応じた対応方法の確立に関する論点にも言及されはじめている（三浦〔2017〕）。それが熟練性の定量化、多様な判断の機械化などの技術的課題であり、作業環境の一過性や自然依存性等にみる現場の大きな変化への対応が、自律分散制御型施工に向けた大きな制約条件にもなっている。

4. i-Construction 推進下の建設業における生産性向上の論点

4-1. 生産システムのフレキシビリティ

建設業の一つのターゲットは「現場の工場化」にあり、製造業の生産技術的動向や FA 化の成果がベンチマークになっている。改めて、産業競争力懇談会 2015 年度プロジェクト最終報告書が製造業との比較から取り上げた建設業の特徴に目を向けると、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労働集約性の 6 点で整理されている。これらを建設現場の「工場化」に関する制約条件としてまとめれば、それは施工対象・作業環境・作業者にみる「高い変動性」として一括することができる。この変動性が建設

業の自律制御型建機及び建設ロボット開発や実用化の高いハードルとなっている。つまり、製造業にみる固定された現場の繰り返し作業の自動化やロボット導入に比して、建設業では作業条件の不安定さが自動化・ロボット開発の克服すべき強い制約条件になっているわけだが、他方では無人化施工の高度化や情報化施工、自動施工の展開で見受けられるように、進歩するデジタル技術がボトルネック解消とハードルを下げる役割を果たしている。

製造業の IoT をはじめとするデジタル技術武装の一つの論点は変動対応であり、変種変量に対する効果的・合理的な生産システム構築の基軸に ICT 活用があるといっている³⁴⁾。ニーズの多様化と労働力不足を背景にさらなる FA 化が目指す先は、安定的な変種変量生産、マス・カスタマイゼーションを可能とする自律分散制御型生産システム構築の実現にある。進化する IoT や CPS ツール実装の生産システム革新の世界観がスマート工場やつながる工場、Connected Industries として示されているといっているであろう。

i-Construction が目指す ICT 実装・活用は、こうした製造業にみる変種変量への対応・争点と発想の立脚基盤は同じであるといっている。つまり、生産年齢人口減少が避けられず、深刻な就業者不足への対応において、自律分散制御型生産システムへの強い指向性が同時代の建設業と製造業で観察されるなか、生産性へのフォーカスと同時に自動化が進む生産システムの高いレベルでのフレキシビリティ実現が両業種の焦点にあるといえる。

4-2. 生産工学アプローチと作業ロス改善アプローチ

建設業と製造業はともにデジタル技術導入や自動化に積極的であるが、生産性向上にみる両業種の行動様式や着眼は少し違ってくる。製造業は同時にヒト作業のありようを重視する傾向が強い一方、i-Construction を推進する建設業では建設プロセスへの労働力投入量の抑制と作業時間縮減による所要工数削減について ICT 建機やドローンなどを活用してヒト作業や人力施工の極力回避を指向する傾向が強い。こうした省人化や工数削減による生産性向上は成果をあげつつあるが、他方で ICT 実装が先行することで、先述したように生産管理・現場管理のありようが ICT 施工普及や自動施工システムに向けた制約条件となる可能性が予見され、デジタル技術の活用に見合った新たな運用枠組みの構築が問われつつある。

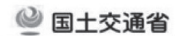
属地生産、作業環境など変動性の高い現場において建設機械のネットワーク化とデジタルデータ活用による自律分散制御を追求する方向性は、製造業の変種変量生産を安定的に稼働させる MES (Manufacturing Execution System) や PLC (Programmable Logic Controller) /シーケンサ、フィールドネットワーク等を駆使する生産管理システムの高度化や FA への取り組みと同じ路線にある³⁵⁾。また、建設業の作業習熟度を争点とする MC・MG 建機にみる未熟練作業支援機能なども、製造業の習熟度の高低差にみる作業支援 (例えば、トルク管理や標準作業ナビなどである) やデジタル技術実装の成果による効率化・合理化と同じターゲットにある。これらの意味において、i-Construction による建設現場の工場化の狙い所は、意図した軌道に乗り始めているといっている。こうした自動化・機械化を基軸とする効率化・合理化の模索を、

ここでは生産工学アプローチとする。他方、作業者にフォーカスし、作業のムダ・ムリ・ムラを中心とする生産ロス削減志向を作業ロス改善アプローチとする。

改めて製造業に目を転じれば、生産性向上を意識する優良現場では、デジタル技術武装と自律分散制御のありようを模索しながら、作業編成についても生産工学アプローチと正味作業時間比率に着目する作業ロス改善アプローチの両面から変動対応に取り組む傾向が強い。産業用ロボットや工作機の導入による自動化が進んでいる一方で、作業の完全自動化は現状の生産技術では難しい。そのため、例えば組立作業のような工程での省力化や生産性向上は動作分析や稼働分析などによる手待ち時間排除や仕掛かり在庫削減によって追求することになる。製造業の優良現場では現場育成の文脈から作業のムダやムリ、ムラの排除をターゲットとする作業方式変更、多工程持ち、人材のマルチスキル化により、付加価値のない作業ロスの排除や作業者の正味作業時間比率向上などのカイゼン手法導入に取り組んでいる。例えば、セル生産の導入がその典型である（金〔2013〕、善本〔2003〕）。こうした生産性向上活動は作業者技能の最大限の活用を基軸とする現場カイゼンの諸相の一つであり、ヒト作業の機械作業化による合理化・効率化とは違うロジックによって進められてきた。製造業ではICTをFA化のみならず、現場カイゼンのさらなる高度化・高速化ツールとして活用する動きが活発化している（金〔2018〕）。

建設業は機械施工が一般的であること、また、元請・下請構造にみる重層的な施工体制や細分化された専門業者による分業制が要因となり、従来は作業ロス改善に目を向けた取り組みの実施が困難であったといえる。i-Construction 推進当初は人力作業の機械化のさらなる推進を

これまでの主な議論と対応状況について



項目	主な議論の内容について	対応
ムリ・ムラ・ムダの可視化 (効果の把握等)	<ul style="list-style-type: none"> 劇的な効果が見込めるところを発見し、無理・無駄を洗い出していくことが必要。簡単でもいいので、現場の可視化のプロセスを早くやった方がいい。 「ムリ・ムダ」など、工程別の進捗の可視化をしていかないと、急激に減っていく労働力に間に合わない。可視化してオープンにすることで市場のベクトルも向き、良くなる考える。 	議題3、4
データの利活用	<ul style="list-style-type: none"> 大量のデータをリアルタイムに引き出せてそのまま使えることが重要。データやAI の分野で、日本の建設分野におけるコアとなる分野について、2〜3個選んで徹底的に作り込んでいくことが必要。 	議題4
産官学民の連携強化	<ul style="list-style-type: none"> 産官学の連携を本格的に進めるべき。 産官学民の連携はその具体化が常に課題となっており、国土交省にも協力いただき、オープンに進めて、建設分野をよく理解しIT を実装できる人材を育てていただきたい。 	議題5
広報 (高齢者・女性活躍等)	<ul style="list-style-type: none"> ダイバーシティのある職場が重要。本日はほとんどが男性であるが、高齢者でも女性でも働くことができ、魅力ある現場の実現のために議論を進めるべき。 「i-Construction」が社会の賛同を得るために、「新しい匠」の見える化をしてほしい。できればそれが女性など典型的な方であれば良い。 	議題6

出所) 国土交通省 i-Construction 推進コンソーシアム企画委員会 (2018 b), 1 ページ。

図 23 ムリ・ムラ・ムダへの着目

選定技術の概要 国土交通省

1-1 工事計画の設計・施工データを用いて、施工を効率化する提案
 例) 3Dモデルを用いた設計・施工データの活用による施工計画の最適化
 例) 3Dモデルを用いた設計・施工データの活用による施工計画の最適化
 例) 3Dモデルを用いた設計・施工データの活用による施工計画の最適化

1-2 材料・機械の位置・動きのデータを用いて、施工計画を改善する提案
 例) 3Dモデルを用いた設計・施工データの活用による施工計画の最適化
 例) 3Dモデルを用いた設計・施工データの活用による施工計画の最適化
 例) 3Dモデルを用いた設計・施工データの活用による施工計画の最適化

1-3 作業員や機械の位置・動きのデータを用いて、施工計画を改善する提案
 例) 3Dモデルを用いた設計・施工データの活用による施工計画の最適化
 例) 3Dモデルを用いた設計・施工データの活用による施工計画の最適化
 例) 3Dモデルを用いた設計・施工データの活用による施工計画の最適化

2-1 作業員や機械の位置・動きのデータを用いて、施工計画を改善する提案
 例) 3Dモデルを用いた設計・施工データの活用による施工計画の最適化
 例) 3Dモデルを用いた設計・施工データの活用による施工計画の最適化
 例) 3Dモデルを用いた設計・施工データの活用による施工計画の最適化

3-1 作業員や機械の位置・動きのデータを用いて、施工計画を改善する提案
 例) 3Dモデルを用いた設計・施工データの活用による施工計画の最適化
 例) 3Dモデルを用いた設計・施工データの活用による施工計画の最適化
 例) 3Dモデルを用いた設計・施工データの活用による施工計画の最適化

4-1 作業員や機械の位置・動きのデータを用いて、施工計画を改善する提案
 例) 3Dモデルを用いた設計・施工データの活用による施工計画の最適化
 例) 3Dモデルを用いた設計・施工データの活用による施工計画の最適化
 例) 3Dモデルを用いた設計・施工データの活用による施工計画の最適化

I-B

コンソーシアム構成員: 奥村組、バスコ、ジャパンギランティサービス、大阪大学、伊藤忠テクノソリューションズ、日本建設機械施工協会
 試行場所: 東海環状自動車道 高富IC北地区

建機の子載センサーやクラウドカメラにより、建機・作業員・資機材の位置や動きを取得し、停滞作業を分析・表示することで作業計画の改善を支援

① 繰り返し工程でのデータ取得
 クラウド連携

② AIによる作業状況判別
 AIモデル

③ 情報から停滞作業の分析
 データの数値化・グラフ化
 デジタルツイン

④ 生産性向上のためのカイゼン活動
 ムダ排除

出所) 国土交通省 i-Construction 推進コンソーシアム
 企画委員会 [2018 c], 7 ページ

出所) 国土交通省 [2018] の「技術 I: データを活用して
 施工の労働生産性の向上を図る技術 ③」から借用

図 24 「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・活用プロジェクト」選定技術の概要

主軸に省人化が追求されている様相がうかがえたわけだが、図 23 にあるように作業のムダ・ムリ・ムラの可視化が革新的技術の議論ともなっており、2018 年度には「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」として、「データを活用して土木工事における施工の労働生産性の向上を図る技術」の公募が実施され、19 件が選定技術として試行されている。そのターゲットは「施工自体の労働生産性を向上すること」³⁶⁾にある。当該選定技術のうちカイゼン活動に目を向ける取り組みもあり、図 24 の I-B にあるように、「作業員や機械の位置や動きのデータを用いて、施工計画を改善する提案」が選定技術として採択され、デジタル技術実装により現場データとして作業状況を収集し、停滞・手待ちのありようを把握する試みが進められるなど、ICT を作業ロス改善に結びつける動きも出てきている³⁷⁾。

4-3. 建設業における生産性向上の論点

i-Construction の推進が呼び水となり、ICT 活用による建設生産システム革新及び生産性向上に向けて、生産工学アプローチの取り組み加速化と作業ロス改善アプローチの動きが歩調を合わせ始めているわけだが、その成果を結実させるためには顕在化しつつある施工現場の生産管理・現場管理上の問題解決に向けた論点整理が不可欠になってくる。特に、元請・下請構造にある建設業にとって、i-Construction 推進で重要な中小業者での展開では改めて重要な論点になることが推察される。

以下では、当該論点を考察していく。第 1 は作業ロス改善アプローチにかかる点である。製造業研究では、ICT 活用により収集した作業・稼働状況データの見える化を生産性向上に結びつける論点として現場能力構築視点を重要視する(善本・藤本 [2009])。その視座を持たない現場では ICT が現状維持管理の確認業務ツールとなり、持続的な生産性向上活動には結びつかなくなる。図 24 の作業ロス改善向けの ICT 活用発想も効率的なデータ収集の容易性が一つ

のトリガーになっているとみてよいが、他方で建設業の特徴である高い変動性が「持続的な作業ロス改善の取り組み姿勢」に影響を与えかねない。過去、その変動性を背景に建設業と製造業の間で生産性向上に温度差が生まれたように、ICT導入であるかどうかを問わず、カイゼン成果が一過性に終始する可能性が浮かび上がってくるため、特に中小業者のカイゼン定着には困難さが伴うことになる。こうした困難の克服に対し、製造業の知見を応用するならば、第1に作業状況を把握するシステムの導入コストと更新容易性、第2にどの現場でも通用する改善点の洗い出しと手法の定石化が効果的であるといえる。

昨今のICTの発展は、特に作業ロス等の改善に意欲を持つがデータ収集にかかる間接工数負担を避けたい製造業の中小企業にとって安価に自動収集可能な改善支援プラットフォームを構築することが可能になっている³⁸⁾。また、カイゼン初心者にとっては、いつでも運用中止を判断できるレベルの導入コスト及び更新・置換の容易性をもったシステムが望ましい（善本〔2013〕）。施工現場の作業ロス把握において、特に中小業者にとってICT施工と連動する重厚長大なシステムでは、変動性を背景とする費用対効果を念頭におき、その導入を躊躇することは容易に想像がつく。この意味では、ICT施工とは独立した現場管理・カイゼン定着支援システムを開発・導入することが必要になってくるといえる。

第2の論点は生産工学アプローチの加速化にかかる点である。自律分散制御型生産システム指向がますます強くなっている製造業では、上述の作業ロス改善アプローチと熟練作業者の知識を積極的に融合させる概念も出てきている。デジタルトリプレット型生産システムがその典型である。スマート工場、考える工場のようにCPSを基軸とする生産システム革新において、デジタルツイン概念拡張により、作業者のカイゼン活動や問題発見・解決活動を一体化させる考え方である（梅田〔2019〕、経済産業省製造産業局〔2019〕）。いわば、生産工学アプローチ偏重により、「日本製造業の強みである現場改善や熟練者の暗黙知を十分に活用できない」³⁹⁾ことが懸念されている。つまり、システム運用における生産管理・現場管理の問題解決において、熟練者業者と作業ロス改善アプローチ活用の重要性が改めて説かれていることに他ならない。ここでいう熟練業者で着目すべきは、技能レベルの高さ以上に問題発見及び問題予見の推論にかかるノウハウや知識である。つまり、作業時間内で不確実性・変化をこなす能力をもった知的熟練の存在である（小池〔1997〕、小池〔2015〕）。

建設現場の工場化の文脈において、三浦〔2017〕は自動施工システムの具体化で志向する現場の工場化として「現場の変化に対応して機械の動きを短時間に変更できるシステムの開発とシステムオペレータの育成」の重要性を指摘し、その効率的稼働や管理上の論点の一つに掲げている。現状の自動施工技術レベルでは、自動化を進めれば進めるほど、変化対応への硬直性は高まることになる。この硬直性が自動化の阻害要因だったはずである。変動性の高い環境下で繰り返し経験を積んだ建設業の熟練技能者は、常に変化や不確実性に対峙してきたこと、また、技能レベルの高さから、その問題発見・解決能力は高いはずである。三浦〔2017〕からの発展的な議論として、この論点について三浦〔2021〕では建設熟練技能者の能力を「熟練性」

の問いとして提起しているわけである。

専門別に細分化された分業体制にある建設業において、マルチスキル化についても「マルチクラフター」の呼称で多能工育成に向けた議論も出始めている⁴⁰⁾。確かに、細分化された専門技能を身につけるマルチスキル化は作業ロス改善の論点では重要視すべきことである。他方で、マルチスキル化以上に自動化を進める上で問われるのは、変化点の的確な把握や対処を可能とする作業者の変化・問題対応能力である。

稲垣〔2016〕や田村〔2018〕にみられるよう、手配順序や作業のありようなどをデジタル技術でデータ化し活用することで熟練技能を維持・継承するシステムの開発も進められているが、その焦点は熟練作業者の専門技能深度にあるとあってよい。興味深いのは、田村他〔2016〕による熟練技能維持システムの次世代建設生産システムへの提案である。そこでは熟練技能を「エラーを防止するシステム」や「気づき改善ツール」⁴¹⁾に結びつけ、生産停滞防止に目を向けた暗黙知の形式知化や工事工程、最適人員配置の計画と施工時の乖離から生じるムリ・ムラ・ムダの排除に活かす論点を提示している。ここでの熟練技能の争点は個々の専門技能ではなく、現場での変化・不確実性対応能力にあるとあってよい。

変化・問題への作業時間内での対処は、ライン停止や稼働率低下など生産性に大きく影響する。変化・問題をリアルタイムで対応・解決する熟練作業者の能力はオペレーションの安定化に効果を発揮し、顕在化した問題とその解決策による問題再発防止は生産システムの改善・アップグレードに結実していく。上述のデジタルトリプレット型生産システムの問題意識は、この点にあるとあってよい。移動生産と施工進捗で現場が可変する建設業において、不確実性と問題の量的・質的内実の常時変化に対応する熟練作業者の能力は生産性のみならず、施工のフレキシビリティを支える立脚基盤となっている可能性が高い。新たな施工方法の導入により、従来とは違う新たな問題の発生や不確実性が増すことは容易に考えられ、ICT実装にみる生産工学アプローチで熟練作業者の変化・不確実性への対応能力をどの程度代替できるか、あるいは置換できるかが問われることになる。この意味で、熟練作業者大量引退問題はMC・MG機能を搭載したICT建機等の未熟練作業者支援にみる熟練作業者の固有技能互換と争点が違ってくる。

以上から、論点を整理してみる。i-Constructionによる機械化・自動化／半自動化・データ活用の効率化・合理化成果は着実に生まれている。他方で、施工の生産性向上策から2つの課題が窺える。第1の課題は機械化・自動化が難しい領域の生産性向上に向けた作業ロス改善の定着である。生産工学アプローチではカバーしきれない通常建機や人力作業などの効率化や作業ロス改善のありようが問われることになる。いわば、ヒト作業と機械作業の両面での生産性向上施策をミックスアップさせるフレームの構築である。第2は変動吸収のありようである。建設業は変動への柔軟な対応を生産性向上に比して重視し、現場に合わせて生産システム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もなっており、その立脚基盤を熟練作業者の変化・不確実性をこなすノウハウや能力が支えている可能性がある。ICT施工による各

種機械の自動化や自律制御化路線による省人化と熟練技能者代替が生産性向上に結びつくとしても、そのことと引き替えにフレキシビリティの低下をもたらすリスクも考えられる。機械で処理できない変化や問題への対応力をいかに高めるかが、システムを運用する生産管理・現場管理で大きく問われることになる。また、生産システムの硬直化やフレキシビリティの低下により、各種機械へのティーチングやデータ化作業など変動対応に必要な隠れ工数が増加する可能性も否定できない。自律分散制御に向けて ICT 施工のロバスト性を高めれば高めるほど、建設業固有の変動を吸収する可変性に富んだ領域の設定がますます不可欠になってくる。

2つの課題に対する個別要素的施策は、先述のように ICT 活用を基軸とする作業状況の見える化と作業ロス・生産ロス改善の指向性、変化・問題対応能力を活かす管理ツール化のように、すでに動き出している⁴²⁾。こうした動向を i-Construction の方向性に合わせ込みまると、建設業生産性向上の論点は「フレキシビリティの維持・向上を前提とした生産性向上の実現」にあると解釈できる。土木工事の属地性や作業環境の一過性、移動生産は変わらない。「工場化」のありようにとって、建設生産システムの可変的構造の強みを強みとして承継する自動化・自律分散制御化が重要になってくる。

5. おわりに

本稿の目的は、建設業と製造業による業種横断的な生産システム高度化の知見相互利用を可能とする道筋の検討に向けて、異分野融合領域を探るための予備考察を実施することにあつた。まずは、本邦建設業にみる建設生産システム革新の論点抽出を試みてきた⁴³⁾。

以下、本稿の考察のもと、その論点を整理してみる。建設業では生産管理・現場管理にみるシステム運用のありようが ICT 施工普及や自動施工システムに向けた制約条件となる可能性が予見され、デジタル技術活用によって高いフレキシビリティを損なわずに生産性向上を図る新たな運用フレームワークの構築が問われつつある。しかしながら、製造業をベンチマークしながらも、その射程範囲は生産工学アプローチ的視点に絞られている様相が強く、建設業が問われている課題に対し、製造業の知見・ノウハウにみる作業ロス改善アプローチが効果を生み出す公算もある。例えば、変動的な施工現場属性を背景とするカイゼン成果一過性の懸念に対しては、製造業のカイゼン普及活動は参考となる。製造業では、カイゼン手法の定石化によって、生産品目や工場を問わず、また産業・業種横断的に作業ロス改善による生産性向上に取り組む活動が展開されている（藤本・柴田〔2013〕、善本・岡部〔2016〕）。つまり、カイゼン手法が生産品目、作業員、作業環境の変化に関わらず実践可能な内容として知見化され、ツールとして活用されている。変動性の高い建設業においても、製造業の ICT を使ったカイゼン環境整備および手法が適用できる領域を見出せる可能性は高い⁴⁴⁾。作業ロス改善アプローチを取り入れながら、その学びを進めることで、自律分散制御型の施工システム開発に向けた制約条件を克服することができるかもしれない。i-Construction 推進にみるデジタル実装の進捗は、

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のありようが問われるようになってきている。重要な論点は、熟練技能者を中心とする、本邦建設業が培ってきた強みである生産のフレキシビリティの高さを活かし、デジタル実装に活かすことである。製造業の工場は、固定された立地での屋内生産であるためクローズドな生産システムとして捉えられがちだが、バラツキのあるインプットをバラツキのないアウトプットとして付加価値化するフロープロセスの内実はオープンなシステムとして機能しており、オペレーションにおいて常態的に何らかの問題が発生する（善本〔2015〕）。安定的なオペレーションを実施するために、変化・問題対応能力に長けた知的熟練を活用する作業編成や人材育成は、製造業が長年にわたり神経を注いできたことであり、そのノウハウや知見を学び、吸収することができれば、建設業界固有の特徴をうまく新たな作業編成に活かすことができるかもしれない。このように、建設業は製造業のカイゼン手法にみる作業ロス改善アプローチの知見を導入することで、建設生産システム革新の動きの加速化を期待することができる。

また、本稿では i-Construction や自律分散制御型の建設生産システム開発の動向から、建設業の論点を「フレキシビリティの維持・向上を前提とした生産性向上の実現」として整理した。当該論点を製造業との比較において位置づけてみたい。本邦の建設業においても、製造業においても、デジタル技術実装によって自律分散制御型生産システムの確立を目指す動きが活発化している。こうした方向性において、特に重視されるのは変種変量生産をいかに効率的・合理的に実現するのか、にある。変種変量生産の効率的・合理的実現を目指す製造業においては、従来からの生産性重視姿勢を変えず、「生産性の維持・向上を前提としたフレキシビリティの実現」を生産システムの命題とする傾向が強い。その典型がスマート工場にみる「マス・カスタマイゼーション」への強い指向性である。他方、建設業は生産性向上を目指す一方で、施工現場に合わせて柔軟に生産システムのありようを変えるフレキシビリティの確保に力点をおく傾向にある。このように、生産性志向が強い製造業とフレキシビリティ重視の建設業で、生産システムで重点をおくパフォーマンスに違いを見出すことができる。両業種の生産システム思想の論点をこうした差異で捉えることが可能であると本稿は考えている。

その差異を踏まえながら、以下では今後の研究発展に向けて両業種で共通する論点を整理してみたい。建設業にみる自律分散制御型の自動化施工は「判断の機械化」がポイントになるわけだが、鹿島建設のクアッドアクセルのように技術開発が進むものの、完全自律化技術の実用化は2020年、2021年段階では実現していない。しかしながら、その技術的制約条件があるとはいえ、武石他〔2020〕のケースに見るように、産業用ロボットと同じく、油圧シヨベルの自動化にあたってティーチングによる単純繰り返し作業の実証などは、多く成果が生まれつつある。「判断の機械化」が生産システム高度化の重要なターゲットであるのは、製造業でも同様である。製造業は多品種・多仕様生産を量産体制下で実現する仕組みづくりの知見を蓄積してきているわけだが、2010年以降、Industry 4.0 や Connected Industries、スマート工場化が目指す姿は、「判断の機械化」による効率的・合理的な自律分散制御型のマス・カスタマイゼー

ションの確立にあるとみてよい。つまり、両業種はともに AI の進歩にみる「判断の機械化」を活用し、サブシステム群を自律分散制御によって稼働させる変種・多様性生産システムを実現する方向性にあると見てよいだろう。

このように「判断の機械化」を共通項に、両業種の目指す生産システム高度化の方向性も、高いレベルのフレキシビリティをもって変種・多様性に対応する自律分散制御型生産システム確立へと近似しつつあるように見える。この路線は両業種の生産性とフレキシビリティの同時実現において、各取り組みをミックスアップさせるチャンスでもある。

製造業の視点からすると、建設業の移動生産下にみる変動対応力とデジタル技術を結びつける取り組みは、IoT や CPS が強く意識されるデジタル技術の生産システム活用の土壌において、変種・多様性生産システム高度化の先進的ケースとして評価することもできる。そうした視点から建設業の取り組みを捉えることで、製造業において生産システム革新の論点として参照すべき知見や技術が見いだせるかもしれない。一見すると、製造業の自動化や自律分散制御の取り組みは建設業に比して先進的である。しかしながら、FA による変種変量生産の実現において、建設業の変動対応に向けた ICT や自動化・自律化技術の研究開発から、定置生産・繰り返し作業では想定しなかった新たな知見や要素技術が見いだせるかもしれない⁴⁵⁾。

人とロボットとの協働に関する、マン・マシンシステムの新機軸を模索する動きも活発化している⁴⁶⁾。デジタル実装、DX を基軸に産業革新への期待が高まるなか、建設業と製造業の領域を越えた技術的相互作用によって、両産業で協働利用できる新たな研究開発領域が生まれるかもしれない。例えば、両産業が率先し、産業界をリードしている協働・協調安全や Safety 2.0 を実現するシステムやプラットフォームなどである。建設業は他産業に比して労働災害発生数、就労中死亡者数が多く、ICT を活用した予防・防止に向けた取り組みが加速度的に進んでいる（建山〔2019 b〕）。先述した無人化施工は、二次災害防止や危険回避を目的に発展してきた。また、safety 2.0 の建設業の先進的な取り組みとして建機災害リスクの低減・回避システムなどがある⁴⁷⁾。付加価値生産性向上と協働・協調安全の同時実現は、マン・マシンシステムの新機軸模索において建設業と製造業で共通する課題であり、協働しやすい領域だといえる。

本稿は建設業と製造業の生産システム高度化に向けて異分野融合領域を探るための予備考察として、建設業にフォーカスし、その動向に目を向けてきた。建設業が測量から設計、施工、維持管理に至るプロセス全体でのデジタル技術実装および生産性向上にフォーカスし、建設生産システム革新を目指している中で、本稿は施工に焦点を絞った考察であった。そのため、デジタル技術実装領域が拡大している中で、生産システムの研究・考察としては、極めて限定的な論点を提示しているに過ぎない。建設生産システム革新の調査領域を広げ、製造業との知見相互利用の新たな視座を見出す必要がある。

本稿の狙いにみる予備的考察の結論は以下である。デジタル技術の発展は建設業と製造業の生産システムの境界区分を縮めつつある。「現場の工場化」を目指す非量産かつ特注生産の建

設業と見込み生産・規格品受注生産の製造業は、それぞれが高度化を目指す生産システムの方向性としては軌道を同じくしており、業種横断的な視点から「変種・多様性生産のFA化」を接点に生産性向上とフレキシビリティ向上において共創領域を設定することが可能であると考ええる。本稿は以上である。

【注】

- 1) 本研究はJSPS科研費基盤研究(C)「研究課題JP17K03980」の助成を受けている。また、本研究にあたって、清水建設、西尾レントオール、日立建機、しが産業生産性向上経営改善センター、建設IoT研究所、可見建設、環境風土テクノ、応用技術、立命館大学理工学部建山和由氏、同理工学部横山隆明氏から資料提供等の協力をいただいた(順不同)。研究支援に深謝する。
- 2) 国土交通省の2016年i-Construction委員会報告書において、i-Constructionを進めるための視点として建設現場の最先端工場化が取り上げられている。「屋外の建設現場においても、近年の衛星測位技術等の進展とICT化により、ロボット技術とデータを活用した品質管理・工程管理が実現」しつつあり、「ICTの本格的な導入・普及を図ることによって、建設現場を自動化・ロボット化など技術集約型の最先端工場へ転換できる」ことが指摘されている(国土交通省i-Construction委員会〔2016a〕, 5ページ)。
- 3) Connected Industriesは2017年に政府が発表した日本産業の目指すべきビジョンである。同ビジョン実現に向けた取り組みについては、例えば、経済産業省製造産業局〔2019〕を参照されたい。そこでは重点5分野のうち、ものづくり・ロボティクス分野に関する製造IoTプラットフォームの考え方に関する概略等が記載されている。また、「つながる工場」等については、昨今の動向等を把握する上で製造業のデジタル技術実装と製造IoTの推進をターゲットとするIndustrial Value Chain Initiative (IVI)の活動(例えば、西岡〔2016〕, 西岡〔2017〕)を参照されたい。
- 4) 建設DXの動向やについて木村〔2020〕, また、5GやAI活用によるDXの興味深いケースとして、青木〔2021〕, 白久〔2021〕, 須田・金井〔2021〕, 渡邊他〔2021〕を参照されたい。
- 5) 製造業と建築業では製品アーキテクチャ論を基軸とする人工物設計の論点から、業界を横断する比較・領域融合研究の試みが実施されている(藤本他〔2015〕)。
- 6) 総務省〔2019〕, 1-3ページを参照。
- 7) 五道〔1997〕, 15ページ。
- 8) 中村〔2017〕, 9ページ。
- 9) 佐溝〔2013〕, 5ページ。中央自動車道笹子トンネル天井板落下事故は、2012年12月2日に高速道路のトンネルで発生した。当該事故については、例えば、『日本経済新聞』2012年12月3日付朝刊、など新聞記事等を参照されたい。
- 10) 佐溝〔2013〕, 4ページ。
- 11) 国土交通省〔2013〕, 4ページ。産業インフラとは主に経済活動を支える農林水産業施設、工業施設などを指す。生活関連インフラとは、主に道路、橋梁、上水道・下水道や各種公共施設などを指す。
- 12) 国土交通省i-Construction委員会〔2016a〕, 3ページ。
- 13) 本文中のi-Constructionの定義は、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)、より引用。
- 14) 本文中にあるi-Constructionの3本柱は「トップランナー施策」の名称で推進されている。各トップランナー施策については、i-Constructionのポイントを含め、竹下〔2018〕で端的にまとめられている。建設生産プロセスは一般的に調査・測量、施工、検査、維持管理/更新で構成され、i-Constructionはプロセス全体をターゲットとする生産性向上施策であるが、本稿では土木構造物の直接工事である「施工」にフォーカスを絞った狭義の生産システムを対象としており、プレキャスト・コンクリートの活用、工期平準化、またi-Constructionにみる建設生産プロセス全体に目を向けた論点考察は、今後の研究課題として展開していく。

- 15) 当該コンソーシアムは、規約において第4条にて「コンソーシアムの目的及び事業に賛同する企業、団体、有識者、関係府省庁、地方公共団体等を会員とする」、第2条で「コンソーシアムは、調査・測量から設計・施工・維持管理までのあらゆるプロセスでICT等を活用して建設現場の生産性向上を図る「i-Construction」を推進するため、様々な分野の産学官が連携して、IoT・人工知能（AI）などの革新的な技術の現場導入や、3次元データの活用などを進めることで、生産性が高く魅力的な新しい建設現場を創出することを目的とする」とあるように、設立されたi-Constructionを推進する仕組みとして設置された産学官連携組織である。
- 16) 渡辺〔2001〕、43ページ。
- 17) 建山・横山〔2016〕、447ページ。
- 18) 情報化施工の歴史や基本的な考え方については、鈴木〔2004〕がわかりやすく論点を整理している。
- 19) 例えば、馬場他〔1996〕、山口〔2007〕、山口〔2013〕、渡辺、〔2000〕、渡辺〔2001〕を参照されたい。
- 20) 国土交通省情報化施工推進会議〔2008〕、3ページ。
- 21) 国土交通省情報化施工推進会議〔2008〕、2ページ。
- 22) 例えば、早川・渡邊〔2010〕、国土交通省大臣官房技術調査課／総合政策局公共事業企画調整課〔2013〕、国土交通省総合政策局公共事業企画調整課（情報化施工推進会議事務局）〔2013〕、国土交通省総合政策局公共事業企画調整課〔2015〕を参照されたい。
- 23) MCは建機の一部を自動制御する技術であり、MGは作業者の建機操作を補助する情報技術である。これら機能を搭載した建機は、ICT建機と呼ばれている。
- 24) ICT活用を切り口に、情報化施工から続くi-Constructionによる生産性向上の取り組みは、建設生産システムに多様な技術呼び込み役割を果たしている。例えば、日本国内でも「建設テック」といった建設と技術（テクノロジー）を掛け合わせた用語が使われ出している。本稿では個別の建設テックやi-Constructionの具体的なケースを本文中で取り上げ、考察することは捨象するが、建設業は施工先が多様で、かつ施工進捗によって現場環境が変化し、また工作物の属地生産的要素が極めて強いといった制約条件を克服する建設業固有のロボット開発などが求められる一方、ドローンや画像処理ツール、MR（Mixed Reality）など汎用的な技術の活用など、進化するデジタル技術を積極的に導入する傾向にある。例えば、i-Constructionの事例は推進コンソーシアムのホームページで事例集として公開されており（<http://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html>：2021年8月30日閲覧確認）、また、ケースや動向を簡潔にまとめた資料としては浅野〔2016〕、木村〔2018〕、経済調査会〔2019〕を参照されたい。
- 25) 吉国〔1982〕、5ページ。
- 26) 吉国〔1982〕、9ページ。
- 27) ICT施工用の建機等の自社保有が難しい中小建設業者などがレンタル建機でも施工が可能のように、すでに建機レンタル業者においても品揃えとして多くのICT建機が準備されており、また、無人化施工もシステムレンタルとして準備されている（2021年8月20日、建機レンタル大手の西尾レントオールへのヒアリング）。本文中の図20はレンタル商品としての無人化施工のデモンストレーションであり、望めば誰もが発展するデジタル技術を利用し、i-Constructionの実践に取り組む環境は整いつつある。
- 28) ICT建機の稼働率問題から収支が悪化するケースも出ている。特に中小規模工事の場合、追加的費用がかかるICT施工において、その成果が出る前に工事が終わる可能性が高い。ICT施工の普及には地方圏で工事を受注する中小業者支援が重要な意味を持つ。
- 29) 国土交通省情報化施工推進会議〔2008〕、4ページ。
- 30) 産業競争力懇談会〔2016〕、6ページ。
- 31) 「雲仙における無人化施工に関する委員会」の無人化施工の施工効率の評価は、有人に対して約50%の評価であった（川上〔1994〕）。当該建設サイトは新技術開発のための実証実験フィールドであった。砂防工事は2020年度で完了し、国土交通省雲仙復興事務所は2021年3月31日に閉所している。近年の雲仙・普賢岳における無人化施工の動向については糸山他〔2018〕、内田〔2017〕を参照されたい。無人化施工による災害復旧の方向性等として、例えば植木他〔2013〕を参照されたい。
- 32) クアッドアクセルのターゲットは「製造業における産業ロボットやCNC加工機のように、多様な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〕)。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〕も参照されたい。クアッドアクセル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(鹿島・前田・竹中土木JV), 赤谷3号砂防堰堤工事(鹿島建設)がある。
- 33) コマツのスマートコンストラクションの考え方について, 長江〔2019〕, 四家〔2021〕などを参照されたい。日立建機のZCOREは日立製作所〔2021〕, また, 同社のZOCRE紹介ホームページである, <https://www.hitachicm.com/global/jp/news-jpn/press/20-08-19j/> (2021年8月20日閲覧), を参照されたい。
 - 34) 建設業で多用される用語と合わせるため, 本文中ではICTとしているが, 製造業ではIT (Information Technology) を使用する場合が多い。
 - 35) 例えば, 変種変量生産に向けた産業用ロボット・FAの論点や動向について, 榊原〔2019〕, 大塚〔2019〕を参照されたい。
 - 36) 矢作・辛嶋〔2019〕, 56ページ。
 - 37) 19件の選定技術概要について国土交通省〔2018〕を参照されたい。
 - 38) 安価なICT導入により, 生産管理と作業ロス改善の成果を上げた中小企業の具体的ケースとして, 長谷川萬治商店〔2018〕や武州工業〔2018〕は興味深い。市販品からシステムを自作実装し, 改善活動定着に結びつけている。
 - 39) 経済産業省製造産業局〔2019〕, 6ページ。
 - 40) マルチクラフターとは「建設工事において, 連続した複数の異なる作業や工程等を遂行するスキルを有する個人, あるいはそれを可能にする生産システム」を指す。国土交通省キャリアパスモデル見える化検討会〔2017a〕, 国土交通省キャリアパスモデル見える化検討会〔2017b〕を参照。
 - 41) 気づき改善ツールでは, 観察記録とカイゼン事項をシステムに保存し, 「事後のフィードバック資料として活用させるとともに, 暗黙知を形式知化する教育ツールとしてナレッジマネジメントに活用し, 次世代へのエラー防止ツールとして伝承させる」(田村他〔2016〕, 85ページ) ことをターゲットにしている。
 - 42) 例えば, 深見〔2020〕にみるように, カイゼン支援に向けてAI等を活用するシステム開発の取り組みも展開されるようになってきている。他方で2015年以降, こうした大がかりなシステムの中小規模工事の取り組みや, 中小建設業での普及展開は進んでいない。
 - 43) ICT施工以外のi-Constructionトップランナー施策である「全体最適の導入」で進められているプレキャスト・コンクリート活用は製造業でいう規格品受注生産のコンセプトであり, また, 建設業の3Dデータ・CIM活用展開は3Dプリンターを基軸に発展するAdditive Manufacturing (AM) の考え方と発想が近いといえる。
 - 44) 滋賀産業支援プラザ・しが産業生産性向上経営改善センター及び滋賀県商工観光労働部の協力を得て, 滋賀県内の製造業と製造業以外を含む3,022社(うち, 重複除いた有効数2,988社, 回答542社)に対し, 生産性向上に対する関心度や業種別傾向の把握を目的に, 製造業知見の活用を土台とする改善活動導入への興味関心や改善指導・生産性向上支援意向等に関するアンケートを実施した(2019年5月~6月)。このアンケートのうち建設業からの回答で, 興味関心はあるとしたうえで, 建設業での活用は難しいとする意見や建設業が該当するのかわからない, また, 構造的な業界の仕組みを踏まえたくて提案をお願いする, 建設業にとっての生産性向上支援とはどういう取り組みなのか, との意見があった。建設業のためアンケートに該当しない, という見解もあった。本稿の段階で補足調査は未実施であるため, 活用が難しいとする意見や該当するのかわからないという意見や該当しないとの見解の背景や理由は不明であるが, 業種の違いが理由の一つであることは推察できる。製造業の作業ロス改善アプローチの知見を産業・業種横断的なツールとして体系化し, 藤本他〔2007〕で示されているようにサービス業に代表される非製造業において改善導入として実践・導入されているわけだが, 本文中でも指摘しているように, 建設業への適用は定置生産・繰り返し作業の知見であること, また製造業におけるPDCAサイクルに与えられる時間軸と建設業の時間軸に違いがあることなどが懸念される事項であると考えられる。
 - 45) 例えば, 常態の変動性への対応, また技術的制約条件克服に向けた建設ロボット開発のありようは, 製造業で展開されるFMSのありように大きく役立つかもしれない。
 - 46) 人とロボットの協働・協調作業は, 産業用ロボットをはじめ, 生産システム高度化の課題として長ら

く議論されているわけだが、例えば、新たなコンセプトとして「合業」の確立が提唱され、多分野で実用化することが目指されるなど、DXの潮流を背景にさらに高度化に向けた研究開発が進められている（機械システム振興協会〔2021〕を参照）。

47) デジタル実装が進む建設業の協働・協調安全について、奥田他〔2020〕を参照。

【参考文献】

【書籍・論文】

- 青木悠〔2021〕「複合現実技術を用いた建設業の生産性向上 3Dホログラフィックを活用した遠隔現場による施工管理の効率化」『土木施工』Vol.62, No.1, 67-70 ページ。
- 浅野祐一〔2016〕『202X インフラテクノロジー』日経BP社。
- 馬場一秋・比留間敏員・藤野敦〔1996〕「情報化施工の現状と課題」『建設マネジメント研究論文集』Vol.4, 49-58 ページ。
- 武州工業〔2018〕「独自生産方式のさらなる効率アップに自作のIoTを活用」工場管理編集部『中小企業が始める！ 生産現場のIoT』日刊工業新聞社, 96-99 ページ。
- 深見誠〔2020〕「先進技術を活用した建設現場の労働生産性向上への取組み～映像認識AIとデジタルツインを用いた施工改善支援システム～」『土木施工』Vol.61, No.1, 82-85 ページ。
- 藤本隆宏・東京大学 21 世紀 COE ものづくり経営研究センター〔2007〕『ものづくり経営学製造業を超える生産思想』光文社新書。
- 藤本隆宏・柴田孝編〔2013〕『ものづくり成長戦略「産・金・官・学」の地域連携が日本を変える』光文社新書。
- 藤本隆宏・野城智也・安藤正雄・吉田敏編〔2015〕『建築ものづくり論』有斐閣。
- 五道仁実〔1997〕「[i-Construction]を進めるための3つの視点」『土木施工』Vol.58, No.1, 15-18 ページ。
- 長谷川萬治商店〔2018〕「木材加工会社がIoTを導入 歩留率をつかみ、生産性向上を目指す」工場管理編集部『中小企業が始める！ 生産現場のIoT』日刊工業新聞社, 92-95 ページ。
- 橋本亮〔2018〕「i-Construction 推進コンソーシアムについて」『土木施工』Vol.59, No.1, 24-25 ページ。
- 早川潤・渡邊賢一〔2010〕「情報化施工技術の一般化・実用化の推進について」『建設マネジメント技術』2010年10月号, 17-21 ページ。
- 猪原幸司〔2018〕「無人化施工の現状および建設無人化施工協会の活動について」『建設マネジメント技術』2018年11月, 48-53 ページ。
- 稲垣孝〔2016〕「作業動線解析を活用した熟練技能維持システムの開発について」『建設マネジメント技術』2016年5月号, 37-43 ページ。
- 稲川雄宣・古屋弘〔2021〕「5Gを用いた統合施工管理システム—一般の道路工事を想定した遠隔操縦による実証実験」『土木施工』Vol.62, No.1, 62-65 ページ。
- 糸山国彦・西島純一郎・平澤太地〔2018〕「雲仙・普賢岳における無人化施工技術」『土木技術資料』Vol.60, No.7, 42-45 ページ。
- 片山三郎〔2015〕「自律制御型建設機械の開発 T-iROBO-Breaker（ブレーカ搭載自律制御型割岩油圧ショベル）」『建設機械施工』Vol.67, No.12, 26-31 ページ。
- 川上義幸〔1994〕「雲仙における無人化施工について」『建設の機械化』No.534, 3-5 ページ。
- 経済調査会〔2019〕『建設ITガイド2019』経済調査会。
- 経済産業省製造産業局〔2019〕「製造IoTの推進～Connected Industriesの実現に向けて」『ロボット』No.249, 1-7 ページ。
- 木村駿〔2018〕『建設テック革命』日経BP社。
- 木村駿〔2020〕『建設DX デジタルがもたらす建設産業のニューノーマル』日経B社。
- 金辰吉〔2013〕『人を活かす究極の生産システム—セル生産の神髄』日刊工業新聞社。
- 金辰吉〔2018〕「成功するIoTプロジェクト8段階のステップ」工場管理編集部〔2018〕『中小企業が始める！ 生産現場のIoT』日刊工業新聞社, 56-69 ページ。
- 小池和男〔1997〕『日本企業の人材形成—不確実性に対処するためのノウハウ』中公新書。

- 小池和男〔2015〕「高業績職場と人材の真の力」藤本隆宏・新宅純二郎・青島矢一編『日本のものづくりの底力』東洋経済新報社、28-55 ページ。
- 国土交通省〔2019〕『国土交通白書 2019』日経印刷。
- 国土交通省総合政策局公共事業企画調整課（情報化施工推進会議事務局）〔2013〕「新たな「情報化施工推進戦略」について－「使う」から「活かす」へ、新たな建設生産の段階へ挑む!!－」建設マネジメント技術』2013年5月号、7-11 ページ。
- 国土交通省大臣官房技術調査課／総合政策局公共事業企画調整課〔2013〕「情報化施工技術の使用原則化について」『建設マネジメント技術』2013年5月号、12-16 ページ。
- 国土交通省総合政策局公共事業企画調整課〔2015〕「情報化施工の推進による生産性向上」『建設マネジメント技術』2015年8月号、10-13 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〕「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・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 (クワッドアクセル)」『建設機械施工』Vol.67, No.12, 21-25 ページ。
- 内閣府〔2019〕『高齢社会白書 <令和元年版>』日経印刷。
- 長江優子〔2019〕「ケーススタディ コマツ>> 建機大手 収益源を「モノ」から「コト」へ」『日経ビジネス』2019年1月14日号、56-60 ページ。
- 中村英夫編〔2017〕『インフラストラクチャー概論』日経 BP 社。
- 日刊建設工業新聞社編集局〔1996〕『生産の構図 日本の建設業の断面』日刊建設工業新聞社。
- 日本建設機械化協会〔1994〕「グラビヤー雲仙普賢岳における無人化施工を終えて」『建設の機械化』No.534。
- 西川充・須田清隆・可見憲夫・黒河洋吾・建山和由〔2019〕「映像による仮想臨場を活用した visual-construction の展開」『土木学会 第 74 回年次学術講演会講演概要集』CS13-10。
- 西岡靖之〔2016〕「日本発スマートものづくり第 10 回 ゆるやかにつながる仕組みを目指す」『日経ものづくり』2016年7月号、115-121 ページ。
- 西岡靖之〔2017〕「『つながる工場』のためのつながる仕組み－新しいシステム理論による学術フロンティア」『精密工学会誌』Vol.83, No.1, 17-20 ページ。
- 奥田悠太・藤井暁也・佐藤有〔2020〕「ICT 技術を用いた人と重機の接触災害リスク低減システムの開発 ICT で人と重機の協調安全」『令和 2 年度 建設施工と建設機械シンポジウム 論文集・梗概集』日本建設機械施工協会、91-96 ページ。
- 大塚亨〔2019〕「三菱電機製産業用ロボットの「CC-Link IE TSN」によるネットワーク対応と「MELFA Smart Plus」による知能化について」『ロボット』No.249, 37-40 ページ。
- 榎原伸介〔2019〕「ロボットとネットワーク～ファナックにおける事例紹介」『ロボット』No.249, 29-32 ページ。
- 佐溝圭太郎〔2013〕「総論 今後急速に老朽化が進むインフラ長寿への取り組み」『国土交通 特集 社会資本メンテナンス元年』No.122, 4-5 ページ。
- 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。
- 四家千佳史・村上数哉〔2019〕「無人建機による自律施工がもたらす未来の建設現場」『建設機械施工』Vol.71, No.7, 12-16 ページ。
- 白久レイエス樹〔2021〕「『建機 DX レベル』の今後の展開 遠隔・自動カテゴリによる建機先進技術の整理」『土木施工』Vol.62, No.1, 48-51 ページ。
- 菅野貞勝・岡田喬・北原成郎〔1994〕「遠隔操作による無人化施工技術」『建設の機械化』No.534, 17-20 ページ。
- 須田清隆・金井理〔2021〕「新型コロナ禍での i-Construction と働き方改善－中小建設業でのリーンマ

- ネージメントと労働改善試行」『JACIC 情報』124号, 10-16 ページ。
- 鈴木明人〔2004〕『情報化施工入門 建設情報とは何か』工学図書株式会社。
- 武石学・土井隆行・野田大輔〔2020〕「自動運転油圧ショベルの現場実証」『令和2年度 建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集』日本建設機械施工協会。
- 竹下正一〔2018〕「ICTの全面的な活用の取り組みと効果－i-Construction トップランナー施策」『土木施工』Vol.59, No1, 26-29 ページ。
- 田村泰史〔2018〕「映像解析技術の活用による技能伝承と生産性向上の取り組み」『建設マネジメント技術』2018年12月号, 44-49 ページ。
- 田村泰史・稲垣孝・桑原茂雄〔2016〕「熟練技能維持システムの開発と生産性向上に関する研究－作業動線解析による生産能力維持と次世代建設生産システム－」『平成28年度 建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集』日本建設機械施工協会, 83-86 ページ。
- 建山和由〔2010〕「情報化施工の現状と今後の展望について－機械化施工について」『地盤工学会誌』Vol.58, No.5, 6-9 ページ。
- 建山和由〔2019 a〕「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。
- 建山和由〔2019 b〕「ICTを活用した建設分野の生産性向上と労働災害防止」『建設の安全』2019年5月号, 10-14 ページ。
- 建山和由・横山隆明〔2016〕「ICTを利用した建設施工の高度化と将来展望」『計測と制御』第55巻, 第6号, 477-482 ページ。
- 植木陸央・猪原幸司・北原成郎〔2013〕「『無人化施工』による災害復旧と今後の取り組みについて」『建設マネジメント技術』2013年6月号, 45-53 ページ。
- 内田智彦〔2017〕「雲仙復興事務所における無人化施工技術の取組とICT土工の導入効果について」『建設マネジメント技術』2018年2月号, 37-41 ページ。
- 梅田靖〔2019〕「巻頭言 今度のデジタル生産システムに求められるもの」『三菱電機技報』Vol.93, No.4, 1 ページ。
- 矢作智之・辛嶋亭〔2019〕「データ活用による建設現場の生産性向上」『土木施工』Vol.60, No.1, 56-58 ページ。
- 山口達也〔2007〕「道路建設工事における情報化施工」『建設マネジメント技術』2007年6月号, 11-16 ページ。
- 山口達也〔2013〕「道路建設工事における情報化施工について」『建設マネジメント技術』2013年5月号, 43-48 ページ。
- 吉国洋〔1982〕「情報化施工とその背景」『土と基礎』Vol.30, No.7, 5-10 ページ。
- 善本哲夫〔2003〕「セル生産の多様性と需要変動への対応－ルームエアコン事業の事例－」『ワールドワイドビジネスレビュー』4巻, 2号, 65-75 ページ。
- 善本哲夫〔2013〕「中堅・中小企業の現場能力構築とFA・IT－改善支援プラットフォーム導入のトライアル－」『立命館経営学』第52巻, 第2・3号, 385-404 ページ。
- 善本哲夫〔2015〕「オープンシステムとしての工場：オペレーションの安定と進化」藤本隆宏・新宅純二郎編『新訂 グローバル化と日本のものづくり』放送大学教育振興会, 137-151 ページ。
- 善本哲夫・藤本隆宏〔2009〕「ITと生産現場育成」『精密工学会 IMS 専門委員会 2008年度活動報告書』精密工学会 IMS 専門委員会, 117-121 ページ。
- 善本哲夫・岡部周平〔2016〕「地域イノベーションと現場改善」『立命館ビジネス・ジャーナル』Vol.10, 33-57 ページ。
- 湯浅勝典・横山隆明・可見憲生・須田清隆・藤原達也〔2020〕「visual-construction による労働生産性改革－建設現場における臨場による非常駐 移動レス化への試行報告」『土木学会 第75回年次学術講演会講演概要集』VI-1080。
- 渡辺一弘〔2000〕「情報化施工の普及促進への取り組み」『建設マネジメント技術』2000年6月号, 24-31 ページ。
- 渡辺一弘〔2001〕「情報化施工のビジョン -21世紀の建設現場を支える情報化施工」『建設マネジメント技術』2001年6月号, 43-46 ページ。

渡邊賢一・金森宗一郎・山内元貴〔2021〕「AI・ロボット等の活用 建設施工分野のDXの推進」『土木施工』Vol.62, No.1, 26-27 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・製品資料等】
- 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.hitachihyeron.com/jp/archive/2020s/2021/01/16/index.html> : 2021年11月10日閲覧)
- 機械システム振興協会〔2021〕「プレスリリース 人間・ロボット間の相互作用を都伴う「合業」に関する戦略策定(新規)」(<https://www.mssf.or.jp/3fyleaflet/3d2gogyo.pdf> : 2021年8月30日入手)。
- 国土交通省〔2013〕「インフラ長寿命化計画(行動計画) 平成26年度～平成32年度」(<http://www.mlit.go.jp/common/001051276.pdf> : 2021年7月28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 i-Construction 委員会〔2016 a〕「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 i-Construction 委員会〔2016 b〕「i-Construction ～建設現場の生産性革命(参考資料)」(<https://www.mlit.go.jp/common/001127740.pdf> : 2020年12月20日入手)。
- 国土交通省 i-Construction 推進コンソーシアム企画委員会〔2016〕「H28年度の実績とH29年度以降の取り組み(第1回資料)」(<https://www.mlit.go.jp/common/001181285.pdf> : 2021年11月10日入手)
- 国土交通省 i-Construction 推進コンソーシアム企画委員会〔2018 a〕「i-Construction の推進状況(第3回企画委員会資料)」(http://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/pdf/01.3_kikaku_siryou1.pdf : 2021年7月29日入手)。
- 国土交通省 i-Construction 推進コンソーシアム企画委員会〔2018 b〕「i-Construction の推進状況(第4回企画委員会資料)」(http://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/pdf/01.4_kikaku_siryou1.pdf : 2021年7月29日入手)。
- 国土交通省 i-Construction 推進コンソーシアム企画委員会〔2018c〕「新技術の開発・導入(第4回企画委員会資料)」(http://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/pdf/02.4_kikaku_siryou2.pdf : 2021年7月29日入手)。
- 国土交通省 ICT 導入協議会〔2018〕「ICT活用工事普及拡大の取り組み(第6回資料2)」(<http://www.mlit.go.jp/common/001226089.pdf> : 2021年8月1日入手)。
- 国土交通省 ICT 導入協議会〔2019〕「ICT施工の普及拡大に向けた取組(第9回資料1)」(<http://www.mlit.go.jp/common/001303213.pdf> : 2021年8月1日入手)。
- 国土交通省建設産業政策会議〔2017〕「建設産業の現状と課題(参考資料)」(<https://www.mlit.go.jp/common/001188729.pdf> : 2021年8月1日入手)。
- 国土交通省情報化施工推進会議〔2008〕「情報化施工推進戦略(本文)」(<http://www.mlit.go.jp/common/000020669.pdf> : 2021年7月28日入手)。
- 国土交通省キャリアパスモデル見える化検討会〔2017 a〕「建設技能労働者のキャリアパス及びマルチクラフター(多能工)の育成・活用事例」(<http://www.mlit.go.jp/common/001179309.pdf> : 2021年8月1日入手)。
- 国土交通省キャリアパスモデル見える化検討会〔2017 b〕「マルチクラフター(多能工)を育成しよう！(リーフレット)」(<http://www.mlit.go.jp/common/001175579.pdf> : 2021年8月1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)。
- 総務省〔2019〕「報道資料 統計トピックス No.119 統計が語る平成のあゆみ」(<https://www.stat.go.jp/data/topics/pdf/topi119.pdf> : 2021年8月20日入手)。
- 福本英士〔2021〕「人と機械が協調する未来の建設現場」『日立建機グループ 総合報告書2021』(https://www.hitachicm.com/global/wp-content/uploads/2021/07/2021_27-28.pdf : 2021年11月10日入手)。

The Innovation and Flexibility of Construction Production System –Cross-industry Issues for the Way of Autonomous Decentralized Control Production Systems–

Tetsuo Yoshimoto*

Abstract:

The purpose of this paper is to prepare a scenario study for the co-creation of an advanced production system by the construction and manufacturing industries. The development of digital technology is narrowing the boundaries between the production systems of the construction and manufacturing industries. A common interest for both is the establishment of autonomous decentralized control systems.

Against the background of the above, I attempt to identify the issues of construction production system innovation in Japan. The focus is on digital technology and the use of KAIZEN knowledge in manufacturing.

The construction industry in Japan is promoting *i-Construction*, a government and industrial policy aimed at increasing productivity. This is the active introduction of digital technology into the overall construction process. In a broad direction, the aim is to develop autonomous decentralized construction production system. Construction production system needs to operate in a highly variable and non-stationary site environment. The ability and flexibility to adapt to variability is the characteristics of a good construction site.

In the construction industry, an advanced case for the development of flexible production systems may be created. The construction industry and the manufacturing industry can mutually learn about autonomous decentralized control system by using multitype-multiplicity production as a starting point of co-creation.

Keywords:

Construction Production System, Autonomous Decentralized Control, Co-creation of an Inter-Industry, i-Construction, Flexibility, Multitype-Multiplicity Production

* Professor, College of Business Administration, Ritsumeikan University

