

建設機械施工の自動化技術評価用 ベンチマーク指標とその活用

阿 部 太 郎・山 内 元 貴・橋 本 毅

本稿では、建設機械施工の自動化技術を（1）技術の自動化程度や難易度を表す自動施工レベル、（2）技術の社会普及の程度を表す社会実装レベルの2軸で評価するベンチマーク指標を提案する。自動施工レベルは自動車における自動運転レベルに倣ったもので、自動化の度合を示す。社会実装レベルは研究開発段階から市場普及段階までの進展度を示している。本指標の活用例として、現在の建設機械施工の自動化技術を当指標にて分類し、それぞれの技術的高度さとその普及状況を考察した結果を示す。

キーワード：建設機械施工、自動施工、ベンチマーク指標、自動施工レベル、社会実装レベル

1. はじめに

近年の建設業界では、高齢化や人口減少による労働力不足に起因する建設業就業者の減少が懸念されている¹⁾。そのため建設機械による施工を自動化することによって、省人化を図る取組が注目されている。例えば、国土交通省の取組である「i-Construction 2.0」²⁾では、2040年度までに施工現場において30%の省人化を達成し、生産性を1.5倍まで向上させることが目標として掲げられている。

上述の目標達成のために欠かせないことは、自動化に関わる施工技術を客観的に評価することである。例えば、国や組織において研究開発プロジェクトを推進する際は、十分な投資、技術開発促進のために自動化技術の客観的な評価が重要となる。技術的高度、すなわち技術の自動化程度や難易度を誤認したり、社会普及程度、すなわち技術が研究開発の途上なのか、既に上市され普及の途上なのかを誤認したりすると、十分な投資や研究開発が実施されない可能性がある。特に、建設機械施工の自動化に関する技術は多様であるため、それらを俯瞰的に評価できる指標が重要となる。

本稿では、建設機械施工の自動化技術を客観的かつ俯瞰的に評価するため、技術的高度さを表す“自動施工レベル”と社会普及の度合いを表す“社会実装レベル”の二軸で構成される自動施工ベンチマーク指標を提案する。また、本指標の使用例として油圧ショベルの自動化等の主要な自動化技術を分類した結果を示す。

2. 関連研究

技術的高度や社会普及度で技術評価を行った事例を紹介する。それらを踏まえて本稿が提案する指標の特徴を述べる。技術的高度や社会普及度による技術評価の事例としては以下が挙げられる。

（1）自動運転レベル³⁾

SAE International が提唱している自動車における自動運転の形態を分類する指標である。運転者がシステム補助を受けながら操縦を行うレベル1から、システムがすべての操縦や状況判断を行うレベル5までの5段階で構成される。

（2）自動施工レベル⁴⁾

森川らによって提案された建設機械施工の自動化技術評価用の指標である。上述の自動運転レベルを参考に提案されたもので、人がシステムの補助無しで建設機械を操縦し施工を実施するレベル0から、施工現場全体の建設機械がすべて自動化され、施工そのものをシステムが制御するレベル5から構成される。

（3）(ARL) Adoption Readiness Level⁵⁾

ある技術を社会普及度の観点で評価するための指標である。市場の受容性や、生産時におけるリスクなど複数の観点から技術評価を行い、商用化などを促すことが目的である。

以上の指標は、技術的高度、あるいは社会普及度の

いずれか一軸で評価を行うためのもので、「技術的高度が高く普及していない」といった状態を一望できない。本稿の指標は、技術的高度と社会普及度の2軸で評価することにより、その両面を同時に俯瞰することを目的としている。

3. 自動施工レベルの検討

本指標の自動施工レベルは、技術の高度さを表すもので、森川らが提案した指標⁴⁾をベースとして再構築したものである。表—1に本指標における自動施工レベルを示す。自動運転レベルが車両単体での自動化程度で定義されるのに対し、自動施工レベルは施工現場全体の自動化程度も評価対象として定義されている。レベル0～2.9にかけては建設機械単独の自動化技術に関する分類であり、レベル3～5は複数台の自動運転建設機械を活用した自動施工事例に関する分類となっている。自動施工の分類は以下の観点から行う。

(1) 作業指示

実際の建設機械施工においては、施工会社が施工開始前に建設機械をどの場所で、どのように使用するか計画を立て、それに基づき現場の職長が各建設機械オペレータに対し指示を行っている。施工会社による作業計画や職長の現場指示を、本稿ではまとめて作業指示を呼称する。施工全体の自動化実現のためにはこの作業指示を自動化する必要がある。表—2に示すように、以下の観点から分類を実施する。

(a) 特定現場への依存性

施工時の作業計画や機械のオペレーション等の作業指示は各現場で個別に計画、指示されているため、特定現場の状況に強く依存している。システムで作業指示を自動化し効率化するためには、作業指示を整理し特定現場への依存性を下げ、複数の現場で使い回せるようにすることが重要である。

自動施工の高度化が実現されるシナリオとして、特定現場で自動施工の検証を実施後、作業指示が整理されることで他の工事に拡大することが考えられる。本指標では特定現場における自動施工をレベル3、作業指示が整理され、特定現場への依存性が低下した自動施工をレベル3.5としている。

(b) 作業指示者（システムか人か）

作業指示者がシステムか人かによる分類である。作業指示が整理されつつも主として人が作業指示を実施している場合は、レベル3.5とし、システムで実施されている場合はレベル4とする。

表—1 自動施工ベンチマーク指標における自動施工レベル

レベル0	非自動運転
レベル1	作業補助
レベル2	機械単独の部分自動化
レベル2.9	機械単独の全体自動化
レベル3	複数機械による自動施工 ・作業指示：人
レベル3.5	複数機械による自動施工 ・作業指示：人 ※特定現場のみ対象とした 作業指示
レベル4	複数機械による自動施工 ・作業指示：システム ※特定現場に限定されない 作業指示 ODD（運行設計領域）内で 自動化
レベル5	複数機械による自動施工 ・作業指示：システム ODDの制約を超えた 完全自動化

表—2 作業指示形態に基づく自動施工の分類

		作業指示の実施者	
		人	システム
作業指示の現場依存性 有無	有	レベル3	レベル4
	無	レベル3.5	

(2) 運行設計領域（ODD）

安全のために、個々の機械が有する性能や使用方法に応じて運用環境等を制限することを指す。自動車における自動運転レベルで考え出された概念で、これにより事故を防止する。例えば鉱山現場で碎石運搬用に使用される自動運転ダンプトラック⁶⁾は、固定エリア内の決められた道を走ることを前提としてODDを設定しており、エリアから逸脱した際は停止させるか、人による運転が行われる。本指標においてはODDにより制約が与えられた状態の自動施工をレベル4、ODDによる制約がない状態、即ち完全な自動施工をレベル5としている。

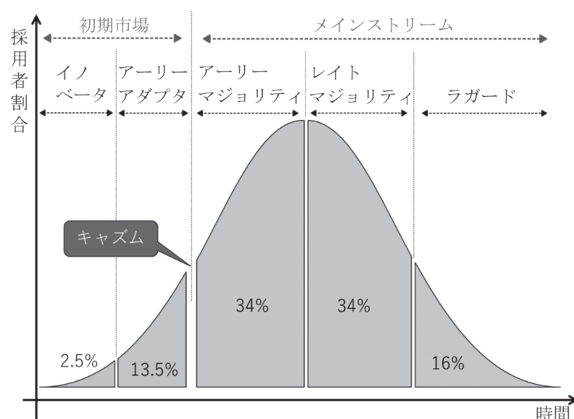
4. 社会実装レベルの検討

本指標における社会実装レベルを表—3に示す。自動化技術の社会的普及程度を示すために、本稿のベンチマークではムーアのキャズム理論⁷⁾に基づいた指標を構築した。

キャズム理論では、イノベータ理論⁸⁾で定義されている5つの消費者グループの普及曲線上に、市場拡

表ー3 イノベータ理論における消費者の分類（例：新技術に対する考え方）

イノベータ	新技術に最も興味有、採用も最も早い
アーリーアダプタ	情報収集して新技術の優位性を判断の内採用
アーリーマジョリティ	上記グループの影響を受けつつ、慎重に判断する
レイトマジョリティ	懐疑的だが、採用者が過半数を超えると追随
ラガード	新技術に関心なし



図ー1 キャズム理論の概要

大の鍵となる“溝”が存在すると説明されている。各グループの分布イメージを図ー1に、新技術に対する姿勢の特徴を表ー3に示す。

イノベータに近いグループほど、新技術採用に積極的なグループである。キャズム理論は、アーリーアダプタとアーリーマジョリティ間の価値観ギャップに注目したものである。市場の最初の16%（イノベータ2.5%＋アーリーアダプタ13.5%）を「初期市場」、残りを「メインストリーム」と呼び、16%を超えれば技術は信頼性を備えており、デファクトスタンダードとして受け入れられているとみなせる。社会実装レベルでは、この閾値を超え普及率20%に達した状態を最終目標とし、表ー4に示すように研究開発状況や市場シェアなどで段階を区分する。

5. 自動施工ベンチマーク指標を活用した自動施工技術の分類

ベンチマーク指標の使用例として、主要な自動施工関連技術の普及度や技術的高度の俯瞰を行う。公開されている情報を元に、主要な自動施工関連の技術や施工事例を本指標へ当てはめることにより、自動施工関連技術の現状を確認する。分類結果を図ー2に、各主要技術の説明を表ー5に示す。分類後の結果を俯瞰すると、例えば以下のことが推察される。

① GNSS／IMU で自己位置を把握し、設計面に合わ

表ー4 自動施工ベンチマーク指標における社会実装レベル

レベル1	研究開発
レベル2	試験施工現場での実装
レベル3	技術の上市
レベル4	市場シェア5%以上
レベル5	市場シェア20%以上

せて作業機を自動制御する技術であるマシンコントロール（以下MC）の内、油圧ショベルMCは上市段階である。更なる社会普及のためには技術を使用することによるメリットの発信、もしくは普及しない原因の調査が必要である。ブルドーザMCはキャズム基準である市場シェア16%を超え、20%以上のシェアがあると推定されるため、安定した普及が望めるとみなせる。

- ②油圧ショベルの自動運転は研究開発、実証レベルである。社会普及を推進させるためには更なる研究開発の実施と上市に向けた実証実験の推進が必要である。
- ③自動施工レベル3.5以上の技術や施工事例が未だ存在しない。社会実装までに時間を要する、あるいは何らかの困難な課題が存在することが推察される。

6. ベンチマーク指標のさらなる活用案

前章でベンチマーク指標により既存技術の分類を実施し、現在の自動施工技術の確認を実施したが、これらは主に建設機械施工全体を対象とした分類である。以下のように対象を限定することにより、さらなる自動施工技術の分析が期待される。

（1）地域別の自動化技術の分類、分析

各地域、例えば各地方自治体において自動化技術分類ができれば、各地域における自動化技術の実態や地域間の比較が可能になる。

（2）特定の工事を対象とした分類、分析

土木工事だけでも、掘削、盛土、締固め、等々様々なものが存在する。個々の工事での自動化技術普及度は異なることが想定される。各工事を例に要素技術に分

		社会実装レベル				
		レベル1: 研究開発	レベル2: 試験施工現場での実証	レベル3: 技術の上市	レベル4: 市場シェア5%以上	レベル5: 市場シェア20%以上
自動施工レベル	レベル0: 非自動運転			遠隔施工		
	レベル1: 作業補助			振動ローラ締固め管理	油圧ショベルMG	
	レベル2: 機械単独の部分自動化			油圧ショベルMC		ブルドーザMC
	レベル2.9: 機械単独の全体自動化	油圧ショベル自動運転		自動運転 ダンプトラック		
	レベル3: 複数自動機械による自動施工 ・作業指示：人		複数機械による自動施工 (ダム建設工事)			
				複数機械による自動施工 (トンネル工事)		
	レベル3.5: 複数自動機械による自動施工 ・作業指示：人 ・特定現場に限定されない作業指示 ・ODD（運行設計領域）内で自動化					
	レベル4: 複数機械による自動施工 ・作業指示：システム ・特定現場に限定されない作業指示 ・ODD内で自動化					
	レベル5: 複数機械による自動施工 ・作業指示：システム ・ODDの制約を超えた完全自動化					

図ー2 自動化施工のベンチマーク指標を用いた自動施工に関わる技術の評価

表ー5 建設機械施工の主要な自動化技術、自動施工事例

◆遠隔施工 概要：操作者が油圧ショベル等の建設機械を遠隔地から操作する技術 自動施工レベル：0（正確には自動化技術ではないが、参考として記載） 社会実装レベル：3（複数メーカーが上市^{9) 10)}、災害現場等の特殊現場で実運用）
◆マシンガイダンス（Machine Guidance, MG） 概要：GNSSなどで機体位置を推定し、3D設計データとの差分をモニターに提示、オペレータの操作を補助する技術 自動施工レベル：1（姿勢・位置を可視化することによる作業補助） 社会実装レベル：4（複数メーカーが上市、災害現場等の特殊現場で実運用）
◆マシンコントロール（Machine Control, MC） 概要：GNSS／IMUで自己位置を把握し、設計面に合わせて作業機を自動制御する技術 自動施工レベル：2 社会実装レベル： ・油圧ショベルMC：3（複数団体が上市^{11) ~ 13)} ・ブルドーザMC：5（主要メーカーによりオプション装備、ブルドーザMGと併せ普及率50%以上¹⁴⁾、MCは推定20%超）
◆振動ローラ締固め管理 概要：転圧回数の管理、または加速度応答により、締固めの品質管理をする技術 自動施工レベル：2 社会実装レベル：3（上市されている事例が複数存在^{15) ~ 18)}。振動ローラ製品にオプション搭載されている場合があるため、より高い社会実装レベルである可能性有）
◆油圧ショベル自動運転 概要：油圧ショベルによる掘削、積込など様々な動作を自動化する。用途の多様さを背景とし、多くの研究事例が存在 自動施工レベル：2.9 社会実装レベル：1～2（国内外の大学^{19) ~ 22)}やスタートアップ企業^{23) ~ 26)}で取組事例有。施工時における作業の複雑さにより未だ実証段階）
◆自動運転ダンプトラック 概要：鉱山現場において、碎石等の運搬のために活用されている 自動施工レベル：2.9 社会実装レベル：3（上市の実績有⁶⁾）
◆施工現場全体の自動化 概要：ダンプトラック・ショベル・ブルドーザなど複数機械を協調制御し、現場工程を統合的に自動化 自動施工レベル：3.0（特定の現場で実証実績が複数存在） 社会普及レベル：2～3（ダム建設工事^{27) ~ 29)}やトンネル工事³⁰⁾で実証中、一部上市済）

類することで、各工事における自動化技術の分析が可能になる。

7. おわりに

本稿では建設機械施工における自動化技術評価のためのベンチマーク指標を提案した。ベンチマーク指標の利用例として、既存の自動化技術を技術的高度および社会普及度で分類することで、自動化技術の現在の様態を俯瞰することができた。

一方で、本指標では自動化技術による省人化効果、工事に掛かる時間の短縮効果は分からない。これらの評価も自動化技術の普及に重要であるため、ベンチマーク指標の要素に取り込む、あるいは別のベンチマーク指標を提案する必要があると考えられる。

本論文で示したベンチマーク指標および、それを構成する自動施工レベル、社会実装レベルは検討段階であるため、様々な意見をいただけると幸いである。

謝 辞

本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第3期「スマートインフラマネジメントシステムの構築」JPJ012187（研究推進法人：土木研究所）によって実施された。



《参考文献》

- 日本建設業連合会, 建設業デジタルハンドブック, <https://www.nikkenren.com/publication/handbook/> (accessed Jun. 12, 2025).
- 国土交通省, 「i-Construction 2.0」を策定しましたー建設現場のオートメーション化による生産性向上(省人化)ー, <https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/content/001738240.pdf> (accessed Jun. 12, 2025).
- SAE International, Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles (SAE J3016), 2021.
- H. Morikawa and T. Otsuki, "Study on the Level Concept of Autonomous Construction in Mechanized Construction," Proc. 37th Int. Symp. Automation and Robotics in Construction (ISARC), Kitakyushu, 2020.
- U. S. Department of Energy, "Adoption Readiness Levels (ARL)," <https://www.energy.gov/arl/adoption-readiness-levels> (accessed Jun. 12, 2025).
- Caterpillar Inc., "500+ Autonomous Trucks Operating Worldwide With Cat® Command for Hauling," 2022, <https://www.caterpillar.com/en/news/caterpillarNews/2022/500-autonomous-trucks.html> (accessed Jun. 12, 2025).
- G. A. Moore, Crossing the Chasm, 3rd ed., Harper Business, 2014.
- E. M. Rogers, Diffusion of Innovations, 5th ed., Simon & Schuster, 2003.
- 熊谷組, 「遠隔操作の建設機械に対するシンクロアスリート複数台の同時接続に成功」, 2024, <https://www.kumagaigumi.co.jp/news/2024/pr-20240607-1.html> (accessed Jun. 12, 2025).
- ㈱フジタ, 「バックホウ用遠隔操縦ロボット ロボ QS」, <https://www.fujita.co.jp/solution-technology/3031/> (accessed Jun. 12, 2025).
- 久 隼人, 「マシンコントロール油圧ショベル PC200i-11」, コマツ技報, vol. 63, 2017.
- 松村 秀雄 and 白澤 博志, 「セミオートマシンコントロールシステムを搭載した油圧ショベルの開発」, 建設機械施工, vol. 68, pp. 27-31, 2016.
- 原 純仁, 「ICT ブルドーザと ICT 油圧ショベルの開発」, 計測と制御, vol. 55, pp. 523-526, 2016, DOI: 10.11499/sicej.55.523.
- 国土交通省, 「ICT 施工の普及拡大に向けた取組」, <https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/content/001631808.pdf> (accessed Jun. 12, 2025).
- 酒井重工業, 「SAKAI 転圧管理システム Compaction Meister」, https://www.sakainet.co.jp/products/ict/compaction_m.html (accessed Jun. 12, 2025).
- 前田建設工業, 「振動ローラ加速度応答法による盛土管理技術『αシステム』」, 2009, https://www.maeda.co.jp/company/gijutu/research/2009/2009_09.pdf (accessed Jun. 12, 2025).
- 大成建設, 「地盤締固めの品質管理システム『T-iCompaction』を開発」, https://www.maeda.co.jp/tech_service/detail/alphasystem.html (accessed Jun. 12, 2025).
- GEOSURF, 「iRoller CE GNSS 締固め管理システム」, https://www.iwasakinet.co.jp/wp-content/uploads/2021/05/iRollerCE_%E3%82%AB%E3%82%BF%E3%83%AD%E3%82%B0.pdf (accessed Jun. 12, 2025).
- H. Yamamoto, M. Moteki, H. Shao, K. Ootuki, Y. Yanagisawa, Y. Sakaida, A. Nozue, T. Yamaguchi and S. Yuta, "Development of the Autonomous Hydraulic Excavator Prototype Using 3-D Information for Motion Planning and Control," Proc. IEEE/SICE Int. Symp. System Integration, 2010.
- R. Heikkilä, T. Makkonen, I. Nishanen, M. Immonen, M. Hiltunen, T. Kolli and P. Tyni, "Development of an Earthmoving Machinery Autonomous Excavator Development Platform," Proc. 36th ISARC, Banff, Canada, 2019.
- ETH Zurich Robotic Systems Lab, "HEAP - The Autonomous Walking Excavator," <https://rsl.ethz.ch/robots-media/heap.html> (accessed Jun. 12, 2025).
- RPTU Kaiserslautern-Landau Robotics Research Lab, "THOR - Terraforming Heavy Outdoor Robot," <https://rrlab.cs.rptu.de/en/robots/more-robots/thor> (accessed Jun. 12, 2025).
- SafeAI Inc., "Autonomous Mining & Construction Solutions," <https://www.safeai.ai/> (accessed Jun. 12, 2025).
- Built Robotics Inc., "Robots that Build the World," <https://www.builtrobotics.com/> (accessed Jun. 12, 2025).
- ARAV (株), <https://arav.jp> (accessed Jun. 12, 2025).
- ㈱ DeepX, <https://www.deepx.co.jp/> (accessed Jun. 12, 2025).
- 鹿島建設, "A⁴CSEL for Dam", https://www.kajima.co.jp/tech/c_a4csel/dam/index.html (accessed Jun. 12, 2025).
- 大成建設, 「大成建設技術トピックス T-iROBO シリーズ」, https://www.taisei-techsolu.jp/tech_center/topics/t-irobo/ (accessed Jun. 12, 2025).
- 大林組, 「新丸山ダム建設工事における盛土工事で『統合施工管理システム』の実証施工に成功」, https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20240411_2.html (accessed Jun. 12, 2025).
- 鹿島建設, "A⁴CSEL for Tunnel", https://www.kajima.co.jp/tech/c_a4csel/tunnel/index.html (accessed Jun. 12, 2025).

【筆者紹介】

阿部 太郎 (あべ たろう)
(国研) 土木研究所
技術推進本部 先端技術チーム
専門研究員



山内 元貴 (やまうち げんき)
(国研) 土木研究所
技術推進本部 先端技術チーム
主任研究員



橋本 毅 (はしもと たけし)
(国研) 土木研究所
技術推進本部 先端技術チーム
上席研究員

