



5G による建設機械の遠隔施工

古 屋 弘

5G は 2020 年 3 月より国内でサービスが開始されたが、大林組ではこれに先立ち総務省の「5G 実用化実証検討業務」の一つとして、5G を建設分野で用いた効果の検証を 2017 年度から実施してきた。2018 年度までは主に災害復旧を想定したシステムを構築し、5G の高速、大容量を活かした遠隔操縦による重機の運転において施工効率の向上などの確認を行い、2019 年度以降は一般の工事への適用を想定し、遠隔操縦のみならず品質管理を行うレーザースキャナなども統合化した「統合施工管理システム」の実証も行った。5G の大容量データ通信により、高品質な映像環境下での建設機械の遠隔操縦の航路塚を達成するとともに、3D スキャナによる転圧前の敷き均し高さの確認や転圧後の仕上がり高さ・平坦性の確認、締め品質管理等をリアルタイムに行えることを確認でき、5G を中心に据えたシステムの有効性を検証することができた。

キーワード：5G、遠隔操縦、ICT、品質管理

1. はじめに

建設分野におけるロボット化は「無人化施工技術」として発展し、今日さまざまな現場で活躍するに至っている。単調・苦渋作業の代替などへの適用も盛んになりつつあるが、特に近年は地震、豪雨、噴火災害など大規模災害の復旧や対策工事に数多く適用され、社会インフラの再構築に無人化施工技術は大いに活用されている。また、建設分野におけるロボット化のニーズは、単なる災害復旧時の危険作業からの安全確保のみならず、災害対応の効果・効率を格段に高めることが期待されている。さらに、社会インフラの老朽化の進行と人口減少・少子高齢化に伴う労働人口の減少に対応した社会インフラの維持管理の合理化（例えば、ワンオペレーターでの複数台遠隔制御等）にも寄与するものと思われる。

大林組と日本電気は、2017 年度より、KDDI が総務省から受託した委託業務「5G を利用した建設機械（以下建機と略記）の遠隔操縦の実証実験」において、建機の遠隔操縦の実証実験を 3 年間実施してきた^{1), 2)}。2019 年度は酒井重工業も加わり、遠隔操縦を実際の道路造成のように施工図面に基づく工事（一般施工）への適用を想定し、5G 通信による遠隔操縦を道路工事のような実工事へ適用する事を想定した実証試験を実施した³⁾。2018 年度の実験結果では、5G 通信を用

いた遠隔操縦は従来の Wi-Fi による遠隔操縦に比べ、30% 程度の施工効率の改善が認められた。2020 年度は官民研究開発投資拡大プログラム（PRISM）¹⁾での試行業務に採択され、実現場の施工において 5G を利用した建機の遠隔操縦の実証実験を実施した。また、土木の現場を想定した場合、ローカル 5G を用いて運用されることが考えられるため、以下報告するローカル 5G を用いた実証実験を実施した。実証実験の大きな目的は、ローカル 5G を用いた複数重機連携の遠隔操縦実証実験確立することにより、キャリア 5G でカバーできない山間部においても大容量の 5G を用いることを可能とし、遠隔操縦の適用範囲拡大が図れることを実証することにあつた。

2. 実証実験の概要

5G の実証実験は、2021 年 3 月に施工中の静岡県御殿場市の調整池の施工現場にて実施した。実証実験は幅 3.3 m×60 m の堤体にコア材を運搬し敷き均し転圧する一連の堤体造成工事であり、実験対象の施工機械は以下の通りである。

- ①油圧ショベルでコア材を 4 回掘削し、キャリアダンプに積込
- ②キャリアダンプはコア材を約 60 m 先（片道）の造成箇所に運搬し、荷下ろしを行う

③ブルドーザーは運搬されたコア材を2回から3回ほど敷き均しを実施

④振動ローラーは幅3.3m×20mでの6回締め作業を行う

実験エリアでは3Dレーザースキャナにて実験開始前に道路造成箇所を測量し、測量した結果をガイダンスモニタにすぐに表示できるように設定した。また、実験ケースとしては以下の2ケースを実施した。

- A) 油圧ショベル (遠隔) キャリアダンプ (遠隔) ブルドーザー (遠隔) 振動ローラー (自動)
- B) 油圧ショベル (超遠隔) キャリアダンプ (自律) ブルドーザー (遠隔) 振動ローラー (自動)

なお、重機側の遠隔操縦システムには開発した「サロゲート」(以降本装置)⁴⁾を用いた。建機の改造が不要で脱着可能であり、遠隔操作と搭乗操作の切り替えを容易に行うことができるため、作業環境に応じて使い分けすることができる。特に、実際の工事では遠隔操縦だけでなく搭乗操作が必要な場合があり、迅速かつ柔軟に遠隔操縦と搭乗操作が行えることも本装置の利点である。図-1にケースBの概略図を示す。

この実験に使用した機器構成を図-2に示す。今回の実証実験では、油圧ショベル、キャリアダンプ、ブルドーザーの計3台の建機を、5Gと5GHz帯無線(4.9GHz無線LAN)を利用して汎用遠隔操縦装置と

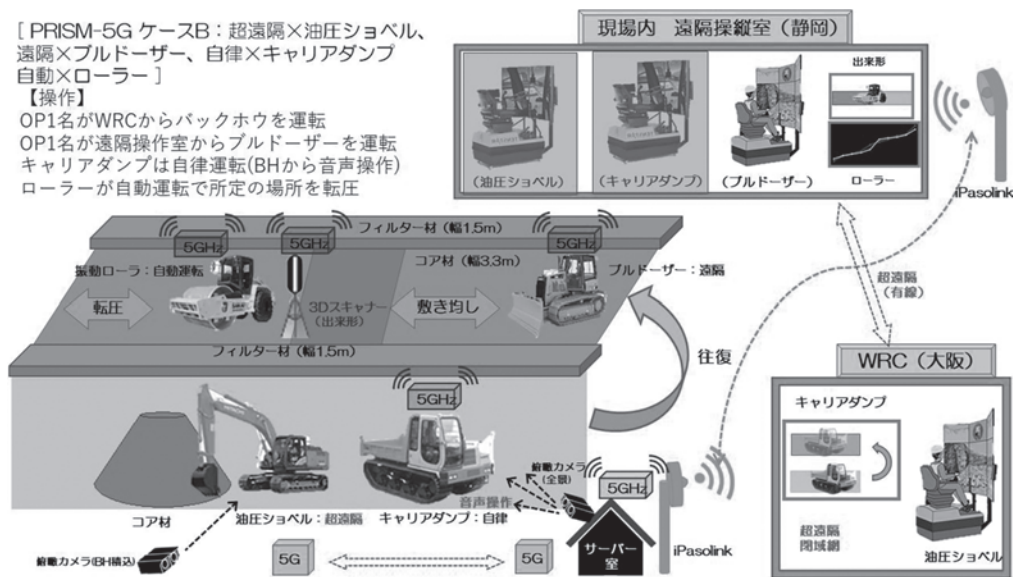


図-1 試験盛土の規模と計測概要

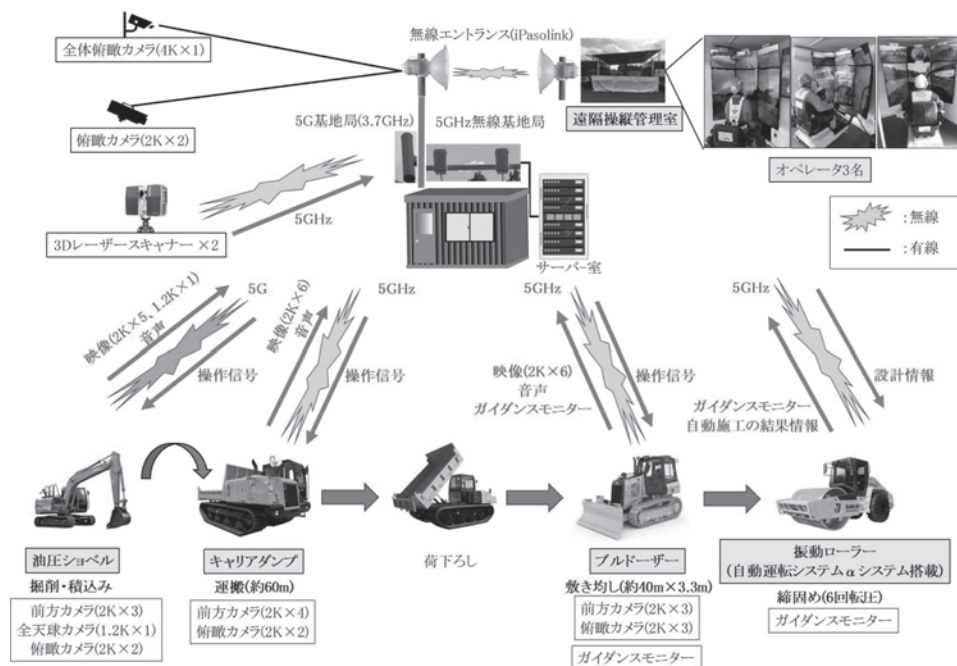
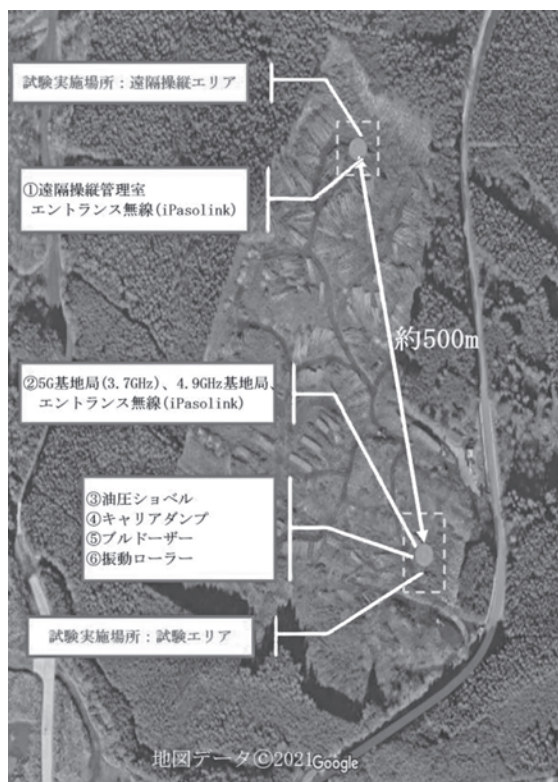


図-2 機器構成

電気信号制御装置による遠隔操縦を行った。5G の高速大容量と低遅延を活用することで油圧ショベルは搭乗操作と同様の操作性を実現させるとともに、5 GHz 帯無線を利用したキャリアダンプとブルドーザーの遠隔操縦及び自動運転システムを搭載した振動ローラーと連携させる。なお、遠隔操縦室は試験ヤードから約 500 m 離れた位置に設置した(写真一1)。また、実証ヤードから約 300 km 離れた大阪枚方市の大林組西日本ロボティクスセンター(以降 WRC)から油圧ショベルの長距離遠隔操縦、キャリアダンプの音声操縦にて搭乗操作と同様の操作性についての確認を行うとともに、一部自律運転も取り入れ実験を行った。

なお、現在の施工方法では測量や施工を順次行って出来上がった工事物(出来形)に対して品質の確認を行うのが一般である。しかし、5G を利用すれば、遠隔操縦に測量や施工の結果を集約して、測量と施工を同時に実施することが可能となり、作業のムラや無駄な工数を削減することができる。今回は、2 台の 3D レーザースキャナを用いて測量を行い、土砂量や造成結果をリアルタイムに遠隔操縦管理室にて把握することによって、一般工事における測量と施工を同時に実施することを再現した。また、*a* システム^{5)~7)}・コンパクトマイスター等の GNSS や加速度応答値による転圧回数、換算乾燥密度、地盤反力係数等による面的品質管理も試行した。



写真一1 実証実験配置図

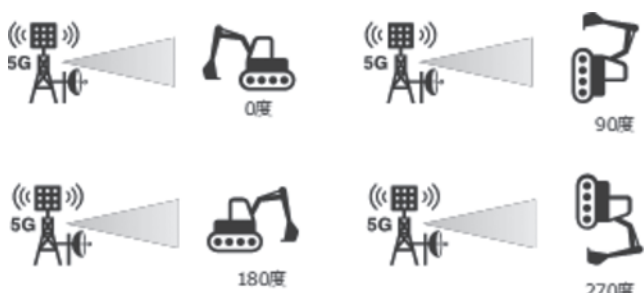
3. ローカル 5G 性能評価

今回紹介する検証において採用したローカル 5G は、NSA (Non-Stand Alone) 方式で構成されていた。基地局制御装置及びコア装置は現場に仮設したプレハブ内に設置し、プレハブ上にローカル 5G アンテナ及び 5 GHz 帯無線アンテナを設置し、各重機との通信を行った(図一2)。基地局と油圧ショベルの距離は 30 m として、油圧ショベルはその場で旋回する動作とした。結果を纏めるにあたり、基地局に対する油圧ショベルの向きを図一3のように定義した。

試験内容として建機の遠隔動作を想定した試験を実施した。具体的には構築したローカル 5G のエリア内に在圏する 5G 端末の性能を確認するため、無線性能試験を実施した。ローカル 5G 端末を設置する油圧ショベルの遠隔操縦を見越して、油圧ショベル動作範囲における静止時と旋回時のそれぞれについて無線品質評価を行った。

構築したローカル 5G エリアの無線特性及び性能評価の観点で、以下①~④の項目を測定した。

- ① SS 基準信号受信電力 (SS-RSRP) : SS 基準信号受信電力は基地局からの電波の受信レベルを評価する基本的なパラメータである。5G 端末に接続した測定用 PC を用いて、5G 端末が受信した SS-RSRP を測定した。
- ② 送信データ転送速度 (UL スループット) : 5G 端末あたりの上りリンクスループットを評価した。本実証においては 2K カメラ映像を伝送するために必要なスループット値である 55 Mbps を達成することを目標値とし、カメラ映像は IP 伝送レート 10 Mbps のカメラを 3 台用いて伝送することを想定した。さらに、コーデックにより 4 Mbps の IP ヘッダが付与されることから、最低でも 42 Mbps 以上の MAC スループットが必要となる。なお、コーデックは映像信号を、主観映像品位を損なわず約 25 ~ 250 分の 1 にデータ圧縮する最先端技術である一方



図一3 基地局に対する油圧ショベルの向き

で、その処理による原理上不可避な遅延が発生する。そのため、伝送容量に応じた最適なコーデックを設定し、遅延を抑制するとともに受信バッファを設けて、映像の途切れが生じないように配慮する必要がある。

- ③送信データのブロック単位での誤り率 (UL BLER) : 無線品質の確認のため、上りリンクのブロック誤り率を iPerf (回線の負荷試験を行うツール) で測定する。
- ④遅延時間 (上り) : 遠隔操縦を行うにあたり、操縦者が違和感なく操縦できるように車体前方を捉えたカメラの映像が遠隔操縦のモニターに映し出されるまでの End to End の遅延量を 200 ms に抑える必要がある。ローカル 5G 通信区間での遅延量を測定することで、遠隔制御への影響を定量的に確認する。建機の遠隔動作を想定した試験においては、油圧ショベル搭載の L2SW (Layer 2 Switch) と EPC (Evolved Packet Core) 間の遅延を測定する。油圧ショベルの 2K カメラ伝送を行った試験においては、油圧ショベル搭載に L2SW と、遠隔制御エリアにある VPN ルータ間の遅延を測定する。測定には Ex Ping (GUI で ping を実行できるソフトウェア) を用いた。

測定結果を表—1 に示す。SS-RSRP については 0

度の場合のみ -95 dBm を下回っている。これは、5G 端末を格納したプラスチック製ボックスの前にあるボックスが遮蔽物となって受信レベルが低下したものと思われるが、全角度において 2K 映像伝送を行うには十分な受信レベルであることを確認した。静止状態で計測した上りスループットは、0 度の測定結果が他の角度に比較して 3~4 Mbps 程度低い結果となった。回転時においては時間平均を取ると 52 Mbps となるが、アームからの電波反射影響や、周辺設備の遮蔽影響に起因して、36~63 Mbps と違いがあったものの、2K カメラ伝送を実現するには十分なスループット値を達成できている。上り BLER は、物理レイヤで計測した誤り率 (最大 30% 程度) と比較して IP レイヤでの誤り率が抑えられている。これは、HARQ (Hybrid ARQ) や RLC (Radio Link Control) レイヤの再送制御により誤り訂正された結果であるためである。IP レイヤでの誤り率が 0% に近いいため、映像伝送でもパケット抜けが発生しにくく、映像乱れの発生防止が期待できることが解った。遅延については、試験サンプルの加算平均値で 30 ms 程度に抑えられており、要求性能である End to End での遅延 200 ms 以内が他の遅延を加えても実現可能なレベルであることが検証された。

表—1 ローカル 5G 検証結果

測定項目	測定結果 (試験中のデータを加算平均したもの)
SS 基準信号受信電力 (SS-RSRP) 設計基準: -90 dBm 程度	静止時
	0 度: -96.4 dBm
	90 度: -89.7 dBm
	180 度: -86.8 dBm
	270 度: -90.8 dBm
送信データ転送速度 (UL スループット) 設計基準: 44 Mbps 以上	回転時: 52.9 Mbps
	静止時
	0 度: 50.9 Mbps
	90 度: 55.0 Mbps
	180 度: 54.7 Mbps
送信データのブロック単位 での誤り率 (UL BLER) 設計基準: 10% 以下	回転時: 12%
	静止時
	0 度: 7%
	90 度: 0%
	180 度: 0%
遅延 設計基準: 30 msec 以下	270 度: 2%
	回転時: 35 ms
	静止時
	0 度: 25.2 ms
	90 度: 27.5 ms
	180 度: 27.1 ms
	270 度: 22.4 ms

4. 実証実験

今回の 5G システムを使った遠隔操縦システムの End to End 遅延を以下の方法で計測した。まず、1/100 秒まで測定できるスマートフォンのアプリケーションを利用し、2 台のスマートフォンの画面を、遠隔操縦管理室にて時刻計測開始時に 1/400 のシャッタースピードで写真撮影を行い、その時間差を計測値とした (写真—2)。

計測は 3 台の建機で 3 回ずつ行い、その平均値を遅延とした。計測結果を表—2 に示す。今回の実験で



(左: 遠隔操縦室での計測開始 右: 遅延計測状況)

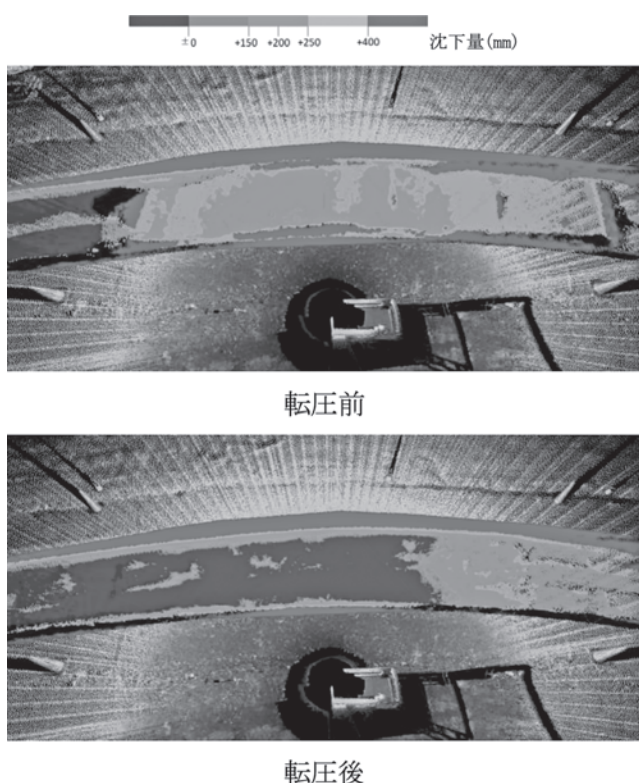
写真—2 遅延計測状況

表一 遅延測定結果

建機	計測値		平均値 (ms)	ビットレート (Mbps)
	基準時差①	計測値②		
油圧ショベル (5G)	00'04	00"14	160	10
		00"23		
		00"24		
キャリアダンプ (5 GHz)	00'04	00"23	190	10
		00"23		
		00"22		
ブルドーザー (5 GHz)	00'04	00"22	190	10
		00"23		
		00"25		

は遅延は 160 ~ 190 ms となり、生産性の高い遠隔操縦 (=映像の空間分解能の向上) を行うために必要な約 50 Mbps のスループットに対して建機の遠隔操縦が違和感なく操縦できる目標指標である 200 msec 以下の結果を得た。

3D レーザースキャナは、地形や構造物の三次元データを取得可能なノンプリズムの計測機器で、計測対象箇所にレーザーを照射し、距離と角度情報を取得して三次元座標を取得する。今回の実験では堤体盛土造成箇所を対象にレーザーを照射し、転圧前と転圧後の三次元座標を取得する計測を実施した。図一 4 に計測結果を示す。点群データを高さで色分けすることにより、転圧前の敷き均し高さの確認や転圧後の仕上がり



図一 4 3D レーザースキャナによる計測結果

高さ・平坦性の確認が可能であると判断された。なお、3D レーザースキャナは遠隔での指示や設定した間隔での計測も可能となっており、敷き均しを行うブルドーザーのオペレーターが、3D レーザースキャナのデータを用いて、現在どの程度の高さ及び平坦性を保っているかの確認も可能である。

堤体盛土の本体施工において、5G 技術を中心とした遠隔操縦を基幹とし、自動運転、マシンコントロール、高性能スキャナの活用などをシステム化した「統合施工管理システム」を実施し、円滑に施工を行うことができた。また、静岡県御殿場市から 300 km 離れた大阪府枚方市からの油圧ショベルの超遠隔や音声操作によるキャリアダンプの自律運転もトラブルもなく実施でき、新たな遠隔操縦技術の実証を行うことができた。

5. 実験で検証された課題

5G 通信は現在いろいろな場所で当たり前利用されているが、建設分野で上記のような活用を考えた場合、以下のような課題もある。

- ①リアルタイムモニタリングや今回のような遠隔操縦では、現地からのデータをアップロードする際の容量確保が重要となる。例えば現在の LTE では DL の利用率が高いため、DL:UL 比は 4:1 程度となっている。今後、ガードバンドを設ける等キャリア 5G との干渉対応により独自に DL:UL 比の設定が可能となれば、5G のミリ波利用でなくても上り通信のさらなる大容量化が可能となる。現在は法律により、DL:UL 比の設定変更は不可であるが、上記変更が可能となる法整備が望まれる。
- ②現段階ではローカル 5G に与えられた帯域は狭く、また申請に時間を要する等、ローカル 5G を円滑に運用する環境を整備する必要がある。
- ③ダム建設現場など山間部や過疎地域での作業が多い建設分野では、商業 5G は整備されていないため、ローカル 5G の利用も視野に入るが、この場合のシステム (基地局と移動局) の迅速な環境整備 (ローカル 5G 用のハードウェアを含む) が重要であるとともに、整備にかかる費用についても低価格への移行が必要である。
- ④5G 通信による遠隔操縦では 5G の特性である大容量によりコーデックの圧縮率の低減が可能となり、低遅延が実現可能となる。しかし、ミリ波 (28 GHz 帯) は指向性が強いいため、重機側に正対装置が必要となる。また、基地局の位置関係から、各重機の作

業配置によって輻輳作業となり、通信が不安定化する可能性がある。これらの課題を解決する技術の開発が望まれる。

6. おわりに

今回の報告では、図1に示したように5Gと5GHz帯無線を利用して汎用遠隔操縦装置と電気信号制御装置での3台の建機(油圧ショベル, クローラキャリア, ブルドーザー)の遠隔操縦と1台の建機(振動ローラ)の自動運転により堤体盛土(コア材)を施工する実験結果とその考察を紹介した。5Gの大容量データ通信により、建機の遠隔操縦が違和感なく操縦できる目標指標である遅延200 msec以下の結果を得ることができた。また、通信品質の劣化が発生しないようにコーデックの受信バッファの値を調整することにより、映像の途切れはほぼ発生せず、遠隔操縦に大きな支障は生じないことも証明した。この結果は、ローカル5Gを用いた建機の遠隔操縦による本体堤体盛土造成を実証し、一般施工へのローカル5G適用の可能性を示すものである。

国土交通省は人工知能(AI)搭載の建設機械による自動施工、5G(第5世代通信規格)を活用した無人化施工の実現に向け、基準類の整備や実用化の推進を行うとしており、2024年から「i-Construction 2.0」を策定し推進している。ここでは「施工のオートメーション化」、「データ連携のオートメーション化」、「施工管理のオートメーション化」を3本の柱が謳われており、これまでのICT施工に加え自動/自律化が推進されることとなっている。これらの要素技術の開発は急ピッチに進みつつあるが、その根幹には通信技術

があり、これらの融合が重要であることも今回解った。我々施工者は、これらの施策に協力しながらさらなる無人化施工等に向けた技術開発を実施していく予定である。

J C M A

《参考文献》

- 1) 官民研究開発投資拡大プログラム (Public/Private R&D Investment Strategic Expansion Program: PRISM (プリズム)), 内閣府, <https://www8.cao.go.jp/cstp/prism/index.htm> (参照 2025-02-09)
- 2) 古屋 弘, 森 直樹, 永嶋 充: 次世代高速通信5Gを用いた重機の遠隔操縦試験, 大林組技術研究所報, No.82, 2018
- 3) 建設無人化施工協会 技術委員会: 無人化施工の推移と展望, 建設の施工企画, No.681, pp.6-12, 2006.11
- 4) 森 直樹, 古屋 弘, 宮内賢治: 建設機械の改造が不要で着脱可能な装置による無人化施工技術の開発, 熊本城崩落石撤去へ汎用遠隔操縦装置「サロゲート」の適用事例, 建設機械施工 Vol.69, No.12, pp.58-63, 2017.12
- 5) 古屋 弘, 藤山哲雄: 振動ローラ加速度応答法による地盤剛性評価装置「 α システム」の開発と実用化, 建設の施工企画 No.728, pp.42~46, 2010
- 6) 古屋 弘, 岩下正剛, 陣内英二他: 5Gを用いた道路工事の統合施工管理システムの開発 大林組技術研究所報, No.84, 2020
- 7) H. Furuya, Y. Tsukimoto, H. Koseki, T. Mansell, V. "Lee" Gallivan and K. Uchiyama: Innovative QC/QA Compaction Method for HMA Pavement using Intelligent Compaction (IC) Technology, The 11th International Conference on Asphalt Pavements, 2010.8
- 8) 根本 司, 高倉 拓, 古屋 弘: 舗装工事の品質管理の合理化= GPSと振動ローラの加速度応答を利用した検討=, 建設機械, 7月号, 2009.7
- 9) 古屋 弘, 小関裕二: 道路工事におけるインテリジェントコンパクトションシステムの開発, 大林組技術研究所報, No.75, 2011

【筆者紹介】

古屋 弘 (ふるや ひろし)
 (株)大林組
 技術研究所
 上級主席技師

