特集>>> 土工

無人化施工の技術的総括と今後

吉 田 貴

無人化施工は、1993年(平成5年)度の試験施工以来、災害復旧工事などで着実に技術革新をしてきた。施工実績も国内で160件を超えるほどになり、併せて、継続的な事業展開により、実用的な工法として確立したと考えている。また、近年の自然災害の増加により、緊急対応時の無人化施工の重要度は増すばかりである。本稿では、無人化施工の技術の概要や変遷、近年の技術革新の紹介および今後の課題と解決策などについて述べる。

キーワード:無人化施工,無線LAN,光ファイバ網,建設ロボット,建設機械

1. はじめに

無人化施工は、「人間が立ち入ることができない、 または一時的な立入りしかできない危険な作業現場に おいて、遠隔操作が可能な建設機械等を駆使し、何ら かの作業を行うこと」と私は位置づけている。無人化 施工は、情報化施工や施工の自動化と混同されること もあるが、施工効率よりも作業の安全確保を最優先と した技術であり、上記技術とは、その観点において一 線を画すものであるとも考えている。

無人化施工で実施する災害対策工事には,災害発生直後の被害を最小限に食い止める,または,二次災害を防止することを目的とした「緊急対応」と,災害がある程度沈静化した後に実施する「計画的実施」に分類できる。この緊急対応と計画的実施では,採用する工種,機械・設備類,施工管理などに違いがある。雲仙普賢岳初期(写真一1),有珠山,南大隅町船石川などが前者に該当し,雲仙普賢岳の砂防堰堤工事などが後者に該当する。前者では,除石工,土嚢積工など,文字通り緊急的に実施して効果がある工種が多く採用され,要求されるものは,容量(遊砂地容量)確保な



写直—1 雪仙試験フィールド施工状況

どで出来型などはあまり求められない。その一方で、後者は、恒久的な構造物の構築が主体の工種となるため、出来型や品質管理も求められる。雲仙普賢岳では、この出来型や品質管理を遠隔地から実施するため、近年の情報化施工に代表される転圧管理、敷均し管理システムなどが当初から採用されてきた。その技術は、その後、一般工事に応用され、情報化施工として普及に至ることとなる。また、雲仙も独特の管理システム・機器(無人測量システムなど)が、近年のICT機器の革新とともに開発・採用されて、独自の革新により、情報化施工を駆使する無人化施工としてさらなる発展をする。

無人化施工に次の転機が訪れるのは、平成23年3月11日に発生した東日本大震災である。その数年前から雲仙では、遠隔操作に無線LANを採用する事例が増えてきたが、これを契機に、今後、想定される広域地震、火山災害などに対応するための「大規模災害を想定した超長距離からの遠隔操作実証実験」を実施し、遠隔操作だけでなく、画像も一括して無線LANで伝送することに成功した(実証実験成果は後述)。この技術は、その後、同年8月に発生した台風12号による紀伊半島大水害の災害復旧工事(北股地区)で本格的に導入されることとなった。また、桜島での無人化施工においても同様の実証実験を実施し、雲仙とほぼ同様の成果が得られており、全国展開ができる技術であることもわかっている。

話は前後するが、無人化施工は、昭和44年(1969年) に常願寺川の応急復旧工事において、河口部に堆積した 土砂の掘削、押土に水中ブルドーザが導入されたのが始 まりとされる。その後、平成5年に国土交通省(旧建設省) により実施された雲仙普賢岳での「試験フィールド制度」 の適用と以後の継続的な事業展開と全国での施工実績 により実用的な工法として確立したと考えている。

平成12年の有珠山噴火災害では、約2km離れた見通しのない場所から直接操作する施工が実施され、雲仙で培った技術が、全国に展開できるものであることを証明するとともに更なる発展を遂げる契機となった。また、平成16年の新潟県中越地震では、大規模土砂崩落現場での災害対策工事を官・民が一体となり成果をあげた。平成22年の鹿児島県南大隅町船石川で発生した深層崩壊による土石流被害では、より一層の早期着手の要求に応じ、施工も順調に終了した。

本稿では、無人化施工の技術の概要や変遷、近年の 技術革新の紹介および今後の課題と解決策などについ て述べる。

2. 無人化施工の概要

(1) 概要

無人化施工は、一般的に遠隔操作式建設機械と無人 化施工設備によって実施する。遠隔操作式建設機械と は、無線または有線による遠隔操作装置が取り付けら れ、調達の際、機械的改造を要しないものを言う。た だし、レバー直動方式による遠隔操作技術も普及して おり、この方式も一般に含む。

(2) 施工可能な工種

現在,無人化施工で施工可能な工種を表—1に示す。当初,除石工のみであった工種は20工種まで対応可能となった。しかし、今後もさらなる対応工種の拡大や施工の効率化が望まれる。

(3) 遠隔操作式建設機械

無人化施工は、火山災害緊急対策工事を背景に発展した経緯があり、土工事を主体とする。このため、遠隔操作機械も土工事に関連したものが多く、ブルドーザ、バックホウ、ダンプトラックなどが主である。ブルドーザとダンプトラックについては、機種・規格も限られているが、バックホウは、比較的、規格がそろっている。これは、バックホウが、工事の主機械であること、遠隔操作化のしやすさ、規格ごとで制御方式の違いが少ないことが起因していると考えている。その他の機械は、遠隔操作化や制御方式の問題と適用工事ごとに開発されてきた経緯などもあり、機種・規格が限られているのが現状である。特に、振動ローラ(写

表一1 無人化施工可能工種一覧

	分類	工種								
		①転圧コンクリート (RCC)								
		② CSG 工法								
1	砂防堰堤等	③有スランプコンクリート								
1	砂奶拖处守	④ ISM 工法								
		⑤ブロック積堰堤								
		⑥鋼製スリット								
		⑦土工事(導流堤/遊砂地)								
		⑧除石工(転石破砕含む)								
		9頭部排土								
		⑩土嚢設置								
		①伐採工								
2	土工事等	⑫山頂での施工 (分解による空輸)								
		③除雪								
		④瓦礫撤去								
		⑤粉塵防止材散布								
		⑥水中掘削								
		②吹付工								
		⑱ブルメタル設置								
3	構造物設置撤去	⑨ボックスカルバート工								
		②構造物撤去工								



写真-2 遠隔操作式振動ローラ

真一2) は全国で数台しか現存せず,また,現存機も 老朽化が激しく,逼迫した状態にある。

遠隔操作式建設機械の選定に当たっては、本機械の 国内保有台数が限られていること、現使用(保管)場 所、搬入における大きさ・最大重量などの輸送制限を 考慮する必要がある。特に、運搬機械は、重ダンプト ラックか不整地運搬車に限られる。施工ヤードの大き さや条件にもよるが、特に軟弱地盤であれば不整地運 搬車のみとなるため留意が必要である。

(4) 映像設備

無人化施工で一般に、無人化施工設備と呼ばれるものを下記に示す。

- ①映像設備(移動,車載,固定カメラ等)
- ②無線設備(操作,データ伝送)
- ③移動カメラ車,移動中継車
- ④遠隔操作室

⑤施工支援設備(情報化施工関連機器含む)

映像設備は、オペレータの目の代わりになるものであり、選定の良し悪しが、施工効率や安全面等に大きな影響を及ぼすと言っても過言ではない。

映像は、従来、50 GHz 帯簡易無線局や 2.4 GHz 帯 小電力データ通信システム無線局 (OFDM 方式) により伝送される。この伝送に求めるのは、高品質な映像、確実な通信 (伝送の連続性)、そして伝送遅延がないことである。

近年,冒頭にも述べた「大規模災害を想定した超長距離からの遠隔操作実証実験」において,映像をデジタル化し,無線LANで操作情報とともに一括伝送する実験を実施した。この実験において,デジタル映像伝送が,遠隔操作の操作性に影響を与える要素として,「伝送遅延時間の短縮」,「映像品質の向上」および「伝送の連続性の確保」の三つがあることが確認された。各要素はトレードオフの関係にあり,ひとつを向上させれば,他者が低下する関係にある。映像の観点から操作性の向上を図るには,作業の難易度を考慮してオペレータに提供する映像を検討することが重要であると考えている(図一1,2)。

(5) 無線設備

無人化施工では、機械の遠隔操作を始めとして様々な無線伝送を行う。遠隔操作用無線は、雲仙普賢岳無

人化施工が開始された当時から現在に至るまで、特定 小電力無線局 429 MHz 帯が主である。一般に、メー カで発売される標準の遠隔操作式建設機械のほとんど が、この無線局を搭載している。

無人化施工は、雲仙普賢岳で施工が開始された当時から現在まで長距離化、複雑化、高度化が求められてきた。このため、特定小電力だけでは対応できず、いくつかの方式が開発されている。近年、無線 LAN による遠隔操作が増加している。これは、従来、ch 数、

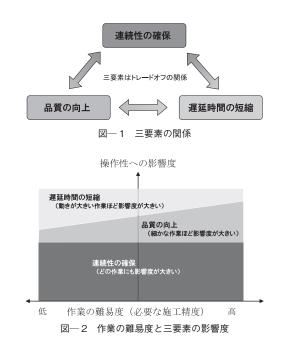
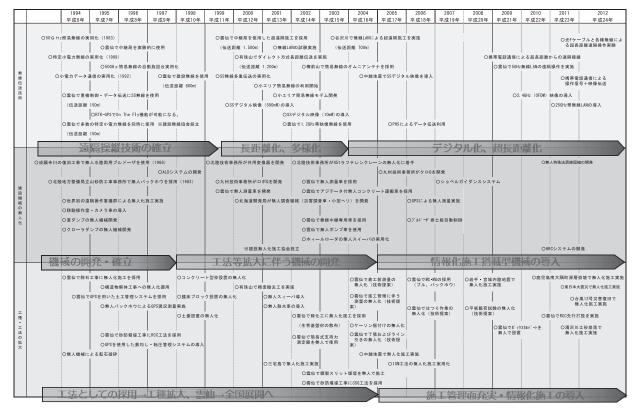


表-2 無人化施工技術の変遷

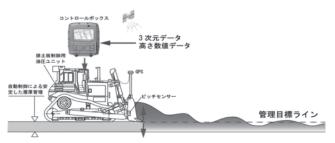


隣接 ch または共振による使用無線数(使用台数)の制限,自他工区で必要な ch 調整,遠隔操作距離の限界および中継方式選定時の設備の複雑化等の問題が特定小電力無線局にはあったからである。ch という概念が IP アドレス設定に置き換わり,施工における使用台数の増大,混信問題の解消される無線 LAN は,非常に有効な無線設備であり,今後も増加すると考えている。しかし,無線 LAN は,一般ユーザも使用するため,使用する帯域と IP アドレスのルール化には留意が必要である。

3. 近年の技術革新

(1) 情報化施工機器

無人化施工において、出来形が求められる場合、情報化施工機器を導入することがある。本項ではブルドーザの排土板制御システムを紹介する。本システムは、ブルドーザの排土板を自動でコントロールし、効率よく規定の高さに仕上げることができるものである。システムは、GPS、各種センサ、コントロールバルブ等から構成される。このシステムを使用することにより、現地での丁張を必要としない敷均し作業と有人以上の敷均し精度の確保が可能であり、作業効率も従来の1.5倍程度向上するとの報告もある。また、作業箇所全面の敷均し標高を色別表示により確認することもできる。



図一3 排土板制御システム概要図

(2) 超長距離からの遠隔操作実証実験

今後,想定される広域地震,火山災害などに対応するため,平成23年3月末から約1ヶ月間,雲仙普賢岳で「大規模災害を想定した超長距離からの遠隔操作実証実験」を実施した。30km以上の超長距離から光ファイバ網と最近使用されるようになった5GHz帯無線LANを活用して操作,画像等を一括で伝送できるかを検証する必要があった。また公共ブロードバンド帯も低周波数帯を使用しているため,電波の回り込みが期待できるため,その能力の検証も大きな課題の一つとした。

実験ではネットワークの伝送状況,無線到達距離,無線の回り込み評価,画像伝送能力等の通信手段検証を含めた8テーマを光ファイバ網+無線LAN等の13ケースで計測をした(表一3)。

実証実験の結果、操作系データの送信遅延時間については100 ms 以内に収まり、画像系データの送信遅延時間については1000 ms 以内であった。これにより、各通信ネットワークにおいて超長距離(82.5 km)の遠隔操作が可能であることが確認できた。なお、本

					ネットワーク					通信回線種類										**	結果				
					中部局								月~重権				*	lR 1		実験 2	実験 3	実験 4	3KW 5		
実験ケース		-2	東京	日の宝	ожед	*##	3	2	20.00	24	中華直	中級政	銀合系	10 M M	月日		①神通神器 (位復時間)		大円確認 信機のデータの伝 送時間	信備作系システム 全体の応答時間	基本作業確認 提別・積込・運搬 49-(75 (平均時間)	プレキャン接受設置 非込・移動・設置 4年(ウル (平均時間)		基本動作確認 8063k, C010k, 8H1,2m3	オベレータの感想
参考値(通常の無人化)		(X)	211.0749	-	-	-	-	-	0	操作室 推行	主業後の	14-MH	IIJ Millian		И		421 msec		250 msec	(470630)	(TAPPER)	(平和時期)			
ケース) (電化			0	章仙 使用事務所	-	大野木場 砂袋製機所	-	-	現場 中継車	0	先27(n) (既設)	25GHz NT/D/7	IIJ MMLAN	MINION MINION	3月27日	(B)	4 msec	548 msec	22 msec	300 msec	213 sec	296 sec 開度 85mm	548 sec		画像が多少遅れるが操作に支薄なし
5-31 (長年	1-1 4 (1)		æ	長崎河川 国道事務所	-	大野木場 砂切監視所	-	-	現場 中級車	0	先27代心 (既設)	25GHz NT929	MIN MIN	MINLAN	3Я29В	(A)	4 msec	418 msec	21 msec	360 msec	216 sec	329 sec 精度 70mm	499 sec		パケットの起こしが少し遅い気がするが 単に支撑なし
ケース) (長年			0	長崎河川 図道事務所	-	大野木場 砂切監視所	HR	HR	現場 中級車	0	先27(A) (既設)	25GHz NT929	MINLAN	MINLAN	зязів	(8)	0 msec	802 msec	41 msec	240 msec	224 sec				画像が多少遅れるが操作に支薄なし
ケース2 (重化			2	集位 保料事務所	-	大野木場 砂袋監視所	-	-	現場 中継車	0	先27·(n) (既設)	25GHz NT/5/9	160 MH	MBLAN	3,Я248	(±)	5 msec	576 msec	10 msec	240 msec	244 sec	211 sec 精度 83mm	614 sec	問題なし	画像が多少遅れるが操作に支撑なし
1-32 (長年			9	長崎河川 国道事務所	-	大野木場 砂切監視所	-	-	技権 中継事	0	先ファイバ (既設)	25GHz NT9>9	16-MH	MINILAN	3月29日	(90)	4 msec	652 msec	16 msec	340 msec	226 sec	310 sec 精度 28mm	516 sec	問題なし	バケットの起こしが少し違い気がするが 単に支撑なし
ヤース2 (長年			Ø	長崎河川 図道事務所	-	大野木場 砂切監視所	田文	田北	現場 中継車	0	先77代n* (既設)	25GHz NT9>9	10-MH	MINI MINI	зЯзів	(*)	5 msec	504 msec	16 msec	440 msec	222 sec				画像が多少遅れるが操作に支薄なし
†-X3	3-1		9	有明電談()。	-	大野木場 砂切監視所	-	-	現場 中継事	0	長距離 無線LAN	25GHz NTY2-9	MINILAN	MINION	4,840	CRD	17 msec	231 msec	26 msec	450 msec	303 sec	479 sec 粮度 13mm	863 sec		画像がスムーズな時とコマ遅れの時が ざり、とても操作し難い。
†=X3	3-2		9	有明電設("A	<u>ኢ</u> ተ <u>ኢ</u> ጳተቱ	大野木場 砂袋監視所	-	-	現場 中継事	0	長距離 無線LAN	25GHz NT/D/9	MINITAN	MINILAN	4月4日	(A)	21 msec	320 msec	177 msec	600 msec	224 sec	330 sec 精度 20mm	718 sec		画像を10枚/秒にした軽乗、画像は若干 軽くなったが、操作に大きな影響はなか た。
7-3	X5		0	素化 使用手指所	-	大野木場 砂切監視所 (画像のみ)	-	-	現場 中継車 (画像のみ)	0	與是通信 (操作室~ 重確)	25GHz NT/5/9	用果老依	MINILAN	4月11B	OFD	計測不能 (1sec以上)	2,000 msec	3,151 msec	1,800 msec				可動の確認のみ	1.5秒程度の操作の遅れがあり、重機の 操作としては簡単な操作に限定される。
サース (長崎			6	長峰河川 国道事務所	-	大野木場 砂切監視所	-	-	現場 中級単	0	先77·(n) (既設)	25GHz NT929	公共68 (モデ1)	Ω#(88 (₹+)*1)	3月31日	(#)	80 msec	369 msec	16 msec	700 msec	255 sec				操作:特定小電力無線及び無線LANに べて若干遅れるが作業に支撑なし。 順像:一部3マ落ちによるアリーズ収象: あり、細かな作業は難しい。
サース 6 (面値) -1		n'9-1/1 30fps ¹⁸ 512kbps	8-1	素位 保料事務所	-	大野木場 砂袋監視所	-	-	78 088	0	先27·(n) (問股)	25GHz NT/5/9	公月88 (モデ)	2,888 (€-†'1)	4月7日	(*)	1 msec	1,089 msec	119 msec	1,000 msec	225 sec	362 sec 精度 90mm	586 sec		勤きの速い作業では面像のコマ落ちが り、何とか操作ができる程度。
		n'9-> 2 15fps 512kbps	(I)-2	章位 保用事務所	-	大野木場 砂切監視所	-	-	78 0 E E	0	先77f/n* (既設)	25GHz NT15/9	Ω#88 (₹-F1)	Ω,#88 (₹-f*1)	4月7日	(*)	1 msec	923 msec	78 msec	900 msec	225 sec				画像の停止や旋回時の画像の乱れが3 り、なんとか操作できる程度。
2 7-X 6 (3540) -2		n'9-1/1 306s 512kbps	®-3	意位 使用事務所	小浜 (先7㎡~ 接続)	大野木場 砂切監視所	-	-	現場 中継車	0	先77代心 (既設)	25GHz NT929	公共88 (モ-F1)	2,888 (€÷1)	4月7日	(*)	3 msec	1,025 msec	93 msec	400 msec	236 sec				認識できるほどの困像の遅れがあり、当 作しづらい。
		n'9-> 2 15(ps 512k0ps	8-4	意仏 食用事務所	小浜 (先27代パー 接続)	大野木場 砂袋監視所	-	-	174 168	0	先27·{n' (既設)	25GHz NT95/9	公共88 (モード1)	Ω,#,00 (€-+'1)	4月7日	(8)	3 msec	809 msec	62 msec	800 msec	236 sec				画像が軽くなり、パケットの向きにより画像が得点した。なんとか操作できる程度
		n'9->3 15(ps 3840ps	(I)-5	重位 住用手指所	小浜 (先27代水- 接続)	大野木場 砂切監視所	-	-	78 188	0	先75-(A* (難酸)	25GHz NT95/9	Ω#66 (€-F1)	Ω,#(88 (4-+1)	4月7日	(8)	3 msec	1,170 msec	104 msec	1,000 msec	238 sec				画像が軽いため遠近感がなく操作しづらい。自への負担が大きく、簡易作業(土) 様込み等)しかできない。
		n'9-0-4 155ps 256kbps	84	章仏 住用手指所	小浜 (先27√n'− 接続)	大野木場 砂切監視所	-	-	276 168	0	先27代A* (既設)	25GHz NT929	公共88 (モ-ド1)	Ω#08 (€-F1)	4,878	(*)	2 msec	850 msec	98 msec	1,000 msec	244 sec				顕像がとても難いたの連近感がなく操作 が怖い。日への負担が大きく、簡易作業 (土砂積込み等)を復時間しかできない
		n'9-> 5 30fps 1Mbps	®-7	景仙 保料事務所	小浜 (丸27ゼパー 接続)	大野木場 砂切監視所	-	-	20 G	0	先27代6 (既設)	25GHz NT929	요휴88 (モ-F1)	2A88 (€-F1)	4月7日	(8)	2 msec	1,220 msec	62 msec	600 msec	219 sec				画像はきれいだが、パケットの向きによ 画像が停止した。細かな作業は回難。
		ハラーン 6 155ps 512kbps 6H2合理動	0-4	素心 住用事務所	小浜 (先774㎡− 接続)	大野木場 砂切監視所	-	-	70 M	0	先27代n* (既設)	25GHz NT95/9	Ω,#88 (4-F1)	2,888 (4-61)	4月7日	(*)	2 msec	564 msec	78 msec	1,100 msec	244 sec				重機! 白と同じ状態。(画像が軽くなり、/ ケットの向きにより画像が停止した。なく とか操作できる程度。)
7-X	1.7		9	20 28+88	-	大野木場 砂切製 境所	-	-	現場 中級車	0	先27代A* (既設)	25GHz NT/5/7	公用88 (七十2)	Ω,R88 (t→2)	4月12日	(水)	故障により実態 出来ず	放陣により実験 出来ず	故障により実験 出来ず	故障により実験 出来ず	故障により実験 出来ず				・GHI2m3銀によるデーム上下までの動作 確認できたが、機器板簿により実験中を となる。

表一3 遠隔操作通信ネットワークの伝送状況確認実験結果

^{※1} fps (Frame Per Second): 1 秒間に表示する画像の数 ※2 bps (Bits Per Second): データ伝送速度。 lbps は 1 秒間に 1 ピットのデータを転送できることを表す。 地上デジタルテレビは、30fps、15~20Mbps である。

実験後,同年8月に発生した台風12号による紀伊半島大水害の災害復旧工事(北股地区)で本格的に導入された。また,桜島での無人化施工においても同様の実証実験を実施し,雲仙とほぼ同様の成果が得られており,全国展開ができる技術であることもわかっている。

4. 今後の課題と解決案

(1) 今後の課題や展望

無人化施工における主な今後の課題や展望について、誌面の関係もあるため、概略を下記に示す。

- ①さらなる工種の拡大
- ②無線等による工事制約
- ③遠隔操作式機械の減少・老朽化
- ④無人化技術の伝承
- ⑤人材(管理者、オペレータ)の不足・高齢化 次項に解決案を示す。

(2) さらなる工種の拡大

無人化施工が今後、さらに発展するためには、工種の拡大が欠かせないと考える。工種の拡大のためには、開発者による技術開発の促進とともに設計等についても無人化施工(建設ロボット技術も含む)を考慮することも重要であると考える。なお、工種拡大について、当センターを含む7社で新型土嚢を用いた高速築堤技術、泥濘化した軟弱地盤改良技術等について研究開発中である。

(3) 無線等による工事制約

近年、無線LAN等の採用により、解消の方向性は 見えてきた。しかし、無線LANは、一般に開放され た帯域であるため、工事専用の帯域確保が望まれる。 前述の雲仙普賢岳実証実験にて公共BBの実効性につ いて確認したが、これらの専用帯域の工事への開放と 技術開発が望まれる。

(4) 遠隔操作式建設機械の減少・老朽化

この問題の一番の解決策は、無人化施工工事の一定量の発注に他ならないと考える。機械の更新をするためには、工事の計画性が見えてこないと非常に難しい。また、工事の規模や内容についても考慮が必要であると考える。この状態が続くと施工実績のある工種が機械の消滅により、施工ができなくなる可能性や施工能力の低下が考えられる。

(5) 無人化技術の伝承

無人化施工技術の継承のためは、国と民間の役割や

守備範囲を明確にし、官民一体となって取組むことが 重要である。前述したが、国の大きな役割のひとつに、 無人化施工工事の一定量の発注が挙げられる。また、 共通の問題としては、技術者(発注側、受注側)に対 する技術の継承がある。当センターも微力ながら、技 術伝承のための技術資料のとりまとめなどを行ってい る。また、平成13年8月に当センターで編集した「緊 急時の無人化施工ガイドブック」について、本年度に 改定をすべく、準備を進めているところである。

(6) 人材の不足・高齢化

管理者(発注側,受注側)の問題について,少し触れたが,オペレータの不足・高齢化についても深刻な問題が残る。無人化施工は,時に,緊急性・迅速性と確実な成果が求められるため,受注者側は,その要求に応じるべく,熟練したオペレータを重用せざるを得ないことがある。このため,全国でも数少ないオペレータの経験差があることも否めない。これは,工事量や工事内容だけの問題ではなく,これを解消するためには,人材育成が欠かせないと考える。当センターも国主導で検討が進められている無人化オペレータの育成計画に協力しているところである。

5. おわりに

雲仙普賢岳の試験フィールドから約20年が経過し, その間,技術は着実に進歩し,対応可能な工種も増えてきた。平成23年3月に発生した東日本大震災において採用された無人化施工は,日本製の技術で,最初に活躍した災害対応ロボットとして,各方面から脚光を浴びた。この技術は、今後、要素も含め、多方面に普及していくと考える。

最後に、本報文を書くにあたり、ご協力およびご指導いただいた関係各位に深甚なる敬意を表します。

J C M A

《参考文献》

- 吉田他:無人化施工の実績と今後の展望について、JACIC 情報 104 号、 p.18-23、平成 24 年 1 月
- 2) 吉田他:雲仙普賢岳超遠隔操作実験における伝送状況確認試験等について, 第13回建設ロボットシンポジウム, 平成24年9月



[筆者紹介] 吉田 貴(よしだ たかし) (一財) 先端建設技術センター 企画部 兼 技術評価室 参事