

# 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

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



写真1 雲仙試験フィールド施工状況

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一1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	砂防堰堤等	① 転圧コンクリート (RCC)
		② CSG 工法
		③ 有スランブコンクリート
		④ ISM 工法
		⑤ ブロック積堰堤
		⑥ 鋼製スリット
2	土工事等	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
		⑪ 伐採工
		⑫ 山頂での施工 (分解による空輸)
		⑬ 除雪
		⑭ 瓦礫撤去
		⑮ 粉塵防止材散布
		⑯ 水中掘削
		⑰ 吹付工
3	構造物設置撤去	⑱ ブルメタル設置
		⑲ ボックスカルバート工
		⑳ 構造物撤去工



写真一2 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-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、メーカー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、

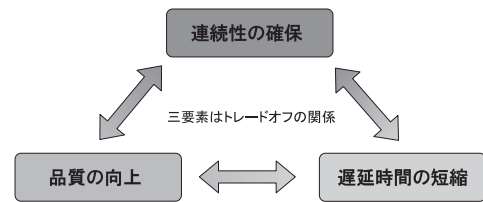


図-1 三要素の関係

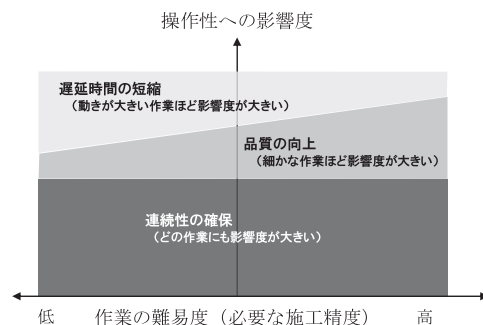


図-2 作業の難易度と三要素の影響度

表-2 無人化施工技術の変遷

Table with columns for years from 1994 to 2012 and rows for 'Wireless Technology', 'Mechanism Development', and 'Engineering/Expansion'. It details various milestones such as 'Establishment of Remote Control Technology', 'Long-distance and Diversification', and 'Digitalization, Super-long Distance'. Includes sub-sections like 'Mechanism Development' and 'Expansion of Engineering'.

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, 今後と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。

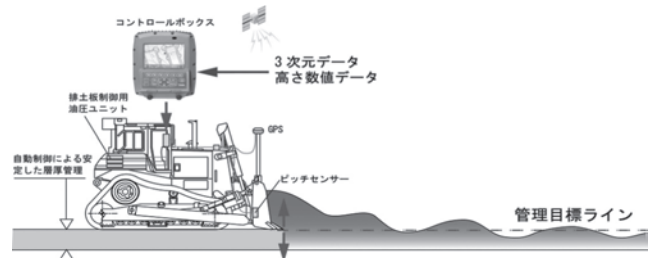


図-3 排土板制御システム概要図

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, 作業箇所全面的敷均し標高を色別表示により確認することもできる。

(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。30 km 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 5 GHz 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-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

表-3 遠隔操作通信ネットワークの伝送状況確認実験結果

Table with 5 main columns: Case No., Network, Communication Method, Experimental Results, and Operator's Impression. It contains 13 rows of experimental data including transmission rates, delays, and distances for various network configurations.

※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。1bps は 1秒間に 1ビ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られる。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られる。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り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。

JICMA

### 《参考文献》

- 1) 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

