

無人化施工のあゆみ

—火山砂防対策を中心として—

まつい むねひろ
松井 宗廣

朝日航洋株式会社
(1993年4月～1997年3月
雲仙復興工事事務所長)



たむら たけし
田村 毅

国土交通省九州地方整備局
雲仙復興事務所長



1. はじめに

無人化施工は「遠隔操作機能等の高度な操作制御システムを有する建設機械および画像装置などにより、作業エリアでは無人の状態で行える施工法」と定義できる¹⁾。従って、無人化施工は「建設機械の遠隔操作」が主要技術である。この無人化施工の歴史をたどれば砂防に関係が深い富山県での1969年の豪雨災害に遡る¹⁾。

この災害では神通川に架かる富山大橋の橋脚が沈下したため、復旧工事として沈下した橋脚の洗掘部の埋め戻し、瀬替え、応急橋の設置が必要になり、河床土砂の掘削・押土に遠隔操作が可能な水陸両用ブルドーザーが導入された¹⁾。これが無人化施工の原点と言える。但し、当時は現在ほど情報通信技術が進んでいなかったため、画像情報などは使われず、操作者が水上に突出した換気塔を見ながら水中の状況を判断し操作した¹⁾。その後、同ブルドーザーは、九州地方建設局大隅工事事務所(当時)管内の野尻川河口部に堆積した桜島からの噴出物除去に利用された。この後、1983年には、北陸地方建設局立山砂防工事事務所において、崩落危険箇所での掘削のため無線による遠隔操作バックホー(0.6m³)が導入された¹⁾。

一方画像情報については、1970年代に中部地方建設局により無人ケーソン施工機械の技術開発が開始され、施工現場からテレビカメラで機械の動作状況の画像を送り、安全な場所でその画像を見て、施工機械を操作するシステムが、1980年代に実用化された¹⁾。

従って、施工現場から離れた場所に設置されたカメラによって状況を把握しつつ、施工機械を遠隔操作する無人化施工の基礎的な技術は1980年代には確立されていたと言える¹⁾。

しかし、その後の無人化施工技術の現場への適用は、現在のような状況にはなかった。

現在は、大規模な土砂災害現場等で人の立ち入りが危険な状況下での作業手段として、なくてはならない技術として活用されている。このような無人化施工技術の活用実態に至った決定的なターニングポイントは、雲仙普賢岳火山噴火災害にあったといえる。

そこで、本稿では雲仙における火山砂防対策を中心に、現在も引き続き無人化施工が実施されている雲仙の、同技術の初期から現在に至る技術開発の「あゆみ」を振り返るとともに、その後の火山砂防対策への適用、大規模土砂災害対応時への展開等について紹介する。

2. 雲仙の無人化施工

2.1 無人化施工が必要とされた背景

長崎県島原半島にある雲仙普賢岳は1990年11月17日、198年ぶりに噴火した。翌年から島原市街地の南にある水無川流域で火砕流と土石流による被害が出はじめた。この被害は、火砕流による死者41名・行方不明3名、土石流による被害とあわせると家屋被害約2,500棟、直接間接被害の合計は、総額約2,300億円に上った²⁾。噴火直後から長崎県により懸命の土砂災害対策が執られたが、人体に対して危険な火砕流が頻発する状況下での対策は困難を極めた(写真-1)。技術的な困難性に加えて、大規模かつ早急・重点的な対策の必要性があることから、長崎県は建設省(当時)に直轄事業化を要望する。これを受けて同省は1993年4月から雲仙復興工事事務所を島原市に新設し、国の直轄事業として火山砂防対策を始めた。



写真-1 民家に迫る火砕流
(1993(平成5)年9月 杉本伸一氏撮影)

火砕流の熱風部の温度は車のタイヤの焼けた跡から摂氏400度²⁾以上あったと想定され、人体に危険であるため、災害対策基本法第63条による警戒区域が設定された。これは、住宅密集地における国内初の事例である。

一方、土石流の発生による被害をこれ以上拡大させないため、火砕流が到達する危険性のある警戒区域内に堆積した土石を一刻も早く、しかも繰り返し取り除く必要があった³⁾。しかし、警戒区域内でオペレータが建設機械を操作して土石を除去することは作業員の安全確保上から困難であった。無人化施工が必須となった背景はここにあった。

2.2 初の試験フィールド制度の適用

山腹から山麓周辺にかけて堆積した約1億7千万m³ (1993年10月時点) もの不安定な火砕流堆積物が発生源となり、降雨の度に土石流が発生し下流の人家を襲った(写真-2)。土石流災害対策の喫緊の課題は警戒区域に位置する遊砂地に堆積した土砂の除去、すなわち除石工事である。

1993年建設省は、行政ニーズが高く、現場での技術的検証を通じて完成度を高める必要のある技術を対象に、民間の開発技術を広く活用する「試験フィールド制度」を適用し、除石工事の無人化施工の実施に向けて、広く民間から無人化施工技術を公募することとした²⁾。技術の公募条件を表-1に示す。なお、この雲仙の事例が同制

度の初の適用となった。公募に至る種々の検討は建設省砂防部の池谷浩火山・土石流対策官(当時・現(一財)砂防・地すべりセンター 研究顧問)を中心に行われた²⁾。

(財)砂防・地すべり技術センター(当時)の協力を得て公募を受付けた結果、民間34社から合計45件の技術応募があり、書類審査、ヒアリング審査を経て委員会による審議の結果、上記技術水準を満たしていると判断された技術提案13件を抽出、その後、九州地方建設局によるヒアリング調査を経て、1993年度内に重機等の調達が可能で施工可能な6社を決定した。この6社の技術はいずれも、除石工事に必要なバックホー、ブルドーザー、ダンプトラックの組み合わせによる除石で、これら全ての建設機械を、安全な地点からの遠隔操作により一連の作業ができる無人化施工技術である。この技術により、警戒区域に設定されている火砕流の危険箇所にある土砂を安全に区域外に搬出し、土砂災害の防止・軽減を図るものである。6社による試験施工を、1994年2月時点で警戒区域に設定されていた、国道57号上流区域を含む6工区で実施した。市民無線(CB無線)の影響と思われる電波障害等の困難があったが、試験施工の結果6社の技術は、いずれも部分的改良の余地はあるものの、所定の技術水準に達していると評価された。

この結果を受けて、1994年10月から無人化施工による本格施工を開始、遊砂地の除石工事を実施した⁴⁾。振り返ればこの工事が、現在では危険な災害現場等でなくてはならない、無人化施工技術へのスタートとなった記念すべき工事であった(写真-3、4)。



写真-2 水無川下流の土石流被害状況 (1993(平成5)年5月 雲仙復興事務所)



写真-3 無人化施工による除石工事状況 (1994(平成6)年11月 雲仙復興事務所)

表-1 雲仙・普賢岳における無人化施工の要求技術水準

	技術の内容	技術水準
1	不均一な土砂の状態であつ、岩の破碎を伴う掘削と運搬が可能であること	直径2~3m程度の礫の破碎が可能であること
2	現地の温度・湿度条件に対応可能であること	一時的には温度100℃、湿度100%程度の条件下でも運転可能であること
3	施工機械を遠隔操作することが可能であること	100m以上の遠隔操作が可能なこと



写真-4 除石工事の無人化施工機械の操作状況 (1994(平成6)年11月 太田一也氏撮影)



写真-5 土砂型枠を用いた本体部の建設
(1996(平成8)年10月 雲仙復興事務所)



写真-6 完成した水無川1号砂防堰堤
(1998(平成10)年11月 太田一也氏撮影)



写真-7 西山火口からの噴火
(2000(平成12)年3月31日
北海道建設部土木局河川砂防課提供)

2.3 水無川1号砂防堰堤の無人化施工

雲仙普賢岳噴火災害における火山砂防対策の切り札は、水無川上流の砂防堰堤群である。水無川では最下流に位置する基幹堰堤の「水無川1号砂防堰堤」建設が最も急がれた。この堰堤の建設位置は警戒区域内であるため、無人化施工による必要がある。そこで、除石工事で実証済である建設機械と同様の建設機械を用いて、施工できる工法を採用した。

具体的には砂防堰堤本体部は超固練りコンクリートを用いた工法(RCC工法)、両袖部は現地発生土砂にセメントを混合した工法(CSG工法)を採用、両工法とも多目的ダム建設で開発されたRCD工法と同様の施工方法で、セメント粉体と骨材を攪拌混合した材料を層状に敷き均し、締固めていく工法である⁴⁾。

この工法によれば、本体部の構築材料である超固練りコンクリートや、左右岸袖部の構築材料である現地発生土砂とセメント粉体を攪拌混合した材料を、ダンプトラックで搬入・積み下ろし、ブルドーザーによる敷きならし、振動ローラーによる転圧という施工形態で工事ができるので、除石作業で実績を積んだ無人化施工機械と同様の建設機械の組み合わせで施工できる。

少し工夫を必要としたのは型枠であったが、現地に膨大な量の土石流堆積物が存在していたので、これを活用することとし、本体部の打設に並行して盛り立てていくことで型枠代わりとした⁵⁾(写真-5)。いわゆる土砂型枠と呼んでいるものである。

1995年9月30日に着手、約2年半の工期で1998年2月19日に完成した「水無川1号砂防堰堤」は、無人化施工で建設した日本初の砂防施設となった(写真-6)。

2.4 雲仙における技術開発のあゆみ

水無川1号砂防堰堤の完成以降、雲仙の現場では多くの技術が開発された。そのあゆみを表-2(6~7ページ)に示す。同表は、雲仙の現場における砂防堰堤等の建設にともなって進化してきた、無人化施工における土木技術分野の技術開発の歩みを示している。これらの技術は、現在国土交通省が、施工合理化のための技術開発として進めているi-Constructionの要素技術の一部が、既に含まれている。



写真-8 無人化施工による橋梁の破碎撤去作業
(2000(平成12)年7月16日
鹿島建設株式会社機械部 青野 隆氏提供)

3. 雲仙から有珠山、三宅島の火山砂防対策へ

3.1 有珠山2000年噴火における無人化施工

平成12年3月31日有珠山は噴火した(写真-7)。西山の西方山麓の国道230号脇で最初に噴火し、翌4月1日には、洞爺湖温泉町背後の金比羅山西側山麓でも噴火、火山灰などが降雨によって泥流・土石流となり市街地に流入する、二次災害の危険性が懸念されていた。被害を最小限に留めるために、噴火の続くなか西山川、板谷川の2河川で、流路工内の堆積土砂の除去などの泥流対策工事に雲仙で開発した無人化施工が活かされることとなった。

有珠山での無人化施工は、雲仙と現場条件が大きく異なった。西山川では市街地を含む区域一帯が「避難指示対象」となったため、無人化施工機械の操作地点と施工地点は最大1.2km離れる必要があった⁶⁾。そこで、北海道は郵政省(当時)に要請、災害時の臨機の措置として、大出力の2Wの建設無線(操作系8局、420MHz帯と映像系8局、2.4GHz帯8局)の免許を受けた⁶⁾。これにより、2,000m離れた遠距離からでも操作可能となった。噴火口から流出した熱泥流により、下流に押し流された橋梁(こんぴら橋)は下流の橋(みずうみ橋)に引っ掛かり流路工を閉塞させた。このため雲仙での公募条件には含まれていたが、雲仙で実働する必要がなかった技術である「岩の破碎」すなわち油圧ブレーカ装着のバックホーが活用され橋梁が破碎撤去された(写真-8)。また、雲仙と同様に無人化施工により流路工内の泥流による堆積土砂が取り除かれた。有珠山における無人化施工の特徴はi)遠距離からの無人化操作と、ii)構造物の破碎を初めて実施したことである。

3.2 三宅島2000年噴火における無人化施工

有珠山の噴火から約5カ月後の平成12年8月、三宅島が噴火した(写真-9)。噴火後、降灰を発生源とし、全島的に泥流災害が生じた。三宅島2000年噴火の最大の特徴は、全島的な泥流被害と、火山ガス(二酸化硫黄等)の長期間にわたる噴出である。火山ガスは人体に有害であり、全島民の避難要因ともなった。火山ガスは1日に数万トンという多量の噴出量であり、復旧作業の進捗を妨げていた。そこで2001年、風向きの影響により特に火山ガスの影響を受けやすい、島の東側に位置する三池地区の沢におけるブロック積みの床固工事に、無人化施工が活用された⁶⁾(写真-10)。



写真-9 御蔵島から望む三宅島の噴火状況
(2000(平成12)年8月18日
東京都三宅島噴火災害誌⁷⁾)



写真-10 無人化施工によるブロック積み
(2001(平成13)年10月
東京都建設局河川部提供)



写真-11 石碑 無人化施工発祥の地
(2016(平成28)年11月
須郷茂夫撮影)

4. 大規模土砂災害への展開と今後の無人化施工

現在の無人化施工技術に至るターニングポイントとなった1994年の雲仙の火山砂防対策を中心に、その技術開発のあゆみと、2000年の有珠山、三宅島への展開を紹介した。しかし、1994年以後の無人化施工は火山砂防以外でも「人の立ち入りが危険な大規模な土砂災害現場」で広く活用されてきた。主なものをあげると、1997年の針原川土石流災害対策、蒲原沢土石流災害対策、2004年の新潟県中越地震(妙見町での大規模土砂崩落現場での災害対策)、2008年の宮城・岩手内陸地震(除石工他)、2011年の台風12号紀伊山地土砂災害における緊急砂防工事、未だ記憶に新しいものとして、2016年の熊本地震災害における阿蘇大橋地区斜面防災工事などである。

無人化施工の技術開発、作業の安全性確保、生産性の向上を目的に、建設会社とメーカー等から構成され、組織された「建設無人化施工協会」のホームページによれば、1994年の雲仙における試験施工以来、2017年10月までの23年間で無人化施工の実績件数は197件に及んでいる。この実績の中には、顕著な大規模災害が殆ど含まれている。無人化施工技術は今や、危険な災害現場にはなくてはならない技術であると言える。

最近の技術であるドローンや3次元データの無人化施工への活用は、既にi-Constructionとして取り組みが始まっている。また、国土交通省は新たな次世代無人化施工技術を支援するため、実証実験のフィールドを提供している。一方、民間では次世代移動体通信規格の「5G」を活用した無人化建設機械の遠隔操作について開発試験が始まっている。

官民一体となった無人化施工技術のさらなる高度化・

効率化が進展し、迅速な災害対応が可能となることにより、土砂災害等による被害の防止・軽減がより一層図られんことを心より祈念する。

5. おわりに

「普賢岳・火山砂防 無人化施工発祥の地」という文字が刻まれた石碑があることをご存じだろうか。災害時に約1,000回も自衛隊のヘリコプターに搭乗し溶岩ドームを観察し続け、島原地区住民からホームドクターとして絶大な信頼を得ていた太田一也九州大学名誉教授の強い要望を受け、無人化施工に携わった当時の建設省職員有志等をはじめ、無人化施工関係建設会社、関係コンサルタント会社の厚意による寄付を原資とし、国土交通省雲仙復興事務所が協力し、火砕流で焼失した旧深江小学校校舎の西側の位置に建立されたものである。ここに、厚意を寄せられた関係各位・各社に記して深く敬意を表します。

平成溶岩によって生まれ、土石流によって運ばれてきた「安山岩」を母石とする記念碑は、平成新山に正対して静かに現地に佇んでいる(写真-11)。

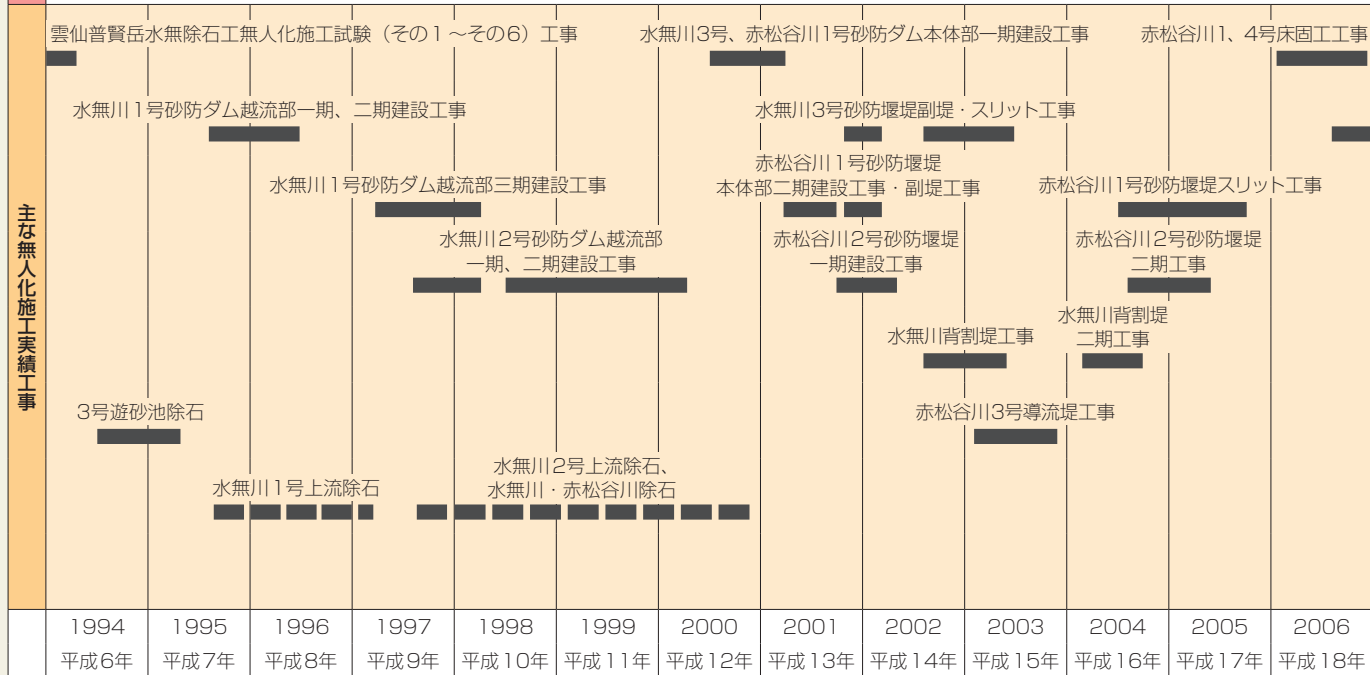
参考文献

- 1) 藤野健一(2003): 無人化施工の現状と展望、建設機械3月号、p.1-6
- 2) 池谷 浩(2003): 火山災害 人と火山の共存をめざして、中公新書、p.168-172
- 3) 松井宗廣(2004): 火山災害対策: 無人化施工に至るまで、土木学会誌、Vol.89、No.7、p.36-37
- 4) 松井宗廣(1995): 雲仙・普賢岳噴火災害と新技術による取り組み、河川5月号、p.27-46
- 5) 中央防災会議、災害教訓の継承に関する専門調査会(2007): 1990-1995・普賢岳火山噴火報告書、p.49-51
- 6) 青野 隆(2003): 有珠山噴火災害復旧工事における無人化施工、建設機械3月号、p.20-25
- 7) 東京都(2007): 平成12年(2000年)三宅島噴火災害誌
- 8) 吉田 貴(2003): 三宅島における無人化施工の導入事例とその期待効果=無人化施工によるガス対策=、建設機械3月号、p.12-15

表-2 雲仙での無人化施工の土木技術分野における技術開発のあゆみ(雲仙復興事務所作成)

項目	1994 平成6年	1995 平成7年	1996 平成8年	1997 平成9年	1998 平成10年	1999 平成11年	2000 平成12年	2001 平成13年	2002 平成14年	2003 平成15年	2004 平成16年	2005 平成17年	2006 平成18年					
土木技術分野	○除石工事に無人化施工を採用	○GPSを用いた土工管理システムを採用	○無人機械による転圧破碎	○無人バックホウによるGPS現況測量実施	○砂防堰堤工事にRCC工法を採用	○GPSを使用した敷均し・転圧管理システムの導入	○Pcaブロック（型枠）設置の無人化	○護床ブロック設置の無人化	○土砂型枠の施工線表示	○無人スリーパ導入	○無人散水車の導入	○簡易支持力測定器を無人で使用	○着工前測量の無人化	○施工管理に伴う測量の無人化	○丁張およびライン引きの無人化	○MG・MC	○はつり作	○緑化工に無人化施工を採用（生育基盤材の散布）

施工写真事例				
				



	1994 平成6年	1995 平成7年	1996 平成8年	1997 平成9年	1998 平成10年	1999 平成11年	2000 平成12年	2001 平成13年	2002 平成14年	2003 平成15年	2004 平成16年	2005 平成17年	2006 平成18年
--	--------------	--------------	--------------	--------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------

2007 平成19年	2008 平成20年	2009 平成21年	2010 平成22年	2011 平成23年	2012 平成24年	2013 平成25年	2014 平成26年	2015 平成27年	2016 平成28年	2017 平成29年	2018 平成30年	2019 平成31年
○有人ヘリによる着工前測量（航空レーザースキャン） ○無人ヘリ測量実験		○アーチカルバート設置工事								○小型無人航空機による写真測量（ICT技術の活用）		
の採用（ブル・バックホウ） 業の無人化										○ターボバケットによる端部の転圧		
○無人植栽工事												○根固めブロック把持装置による層積み



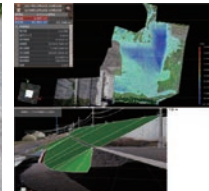
無人測量システム



ブルドーザ排土板自動制御 (MC)



着工前航空レーザー測量



小型無人航空機による写真測量及び出来形管理



丁張およびライン引きの無人化



はつり作業の無人化 (目地切砂置換工法)



アーチカルバートの設置作業



ターボバケットによる転圧



根固めブロック把持装置による層積み

