

建設機械の遠隔操作技術 (ヒューマンインターフェイス)に関する研究

藤野 健一・茂木 正晴・大槻 崇

現在、災害発生時(地震・噴火などによる災害)における初動対応として無人化施工が適用されており、雲仙普賢岳等で利用されている。この無人化施工の適用に関しては、災害の規模や現場状況(人への危険度合い)によって判断されている。

無人化施工技術は、遠隔によって建設機械を操作するものが多く、多くの遠隔操作による建設機械が開発されてきた。その中でも、雲仙普賢岳における噴火後の災害緊急対策として、除石工事における掘削・積込み・運搬といった場面に遠隔操作による無人化施工が活用されている。

本研究では、雲仙普賢岳での無人化施工に利用されている遠隔操作技術と国土交通省での総合プロジェクト(平成17~19年度)「ロボット等によるIT施工システムの開発」によって研究開発された操作システムに関して、操作性等に関する比較検証実験の結果とオペレータの遠隔操作技術に関する技術的ニーズについて報告するものである。

キーワード：遠隔操作技術、IT施工システム、災害、建設機械、油圧ショベル

1. はじめに

無人化施工の適用に関しては、災害の規模や現場状況(人への危険度合い)によって個別に判断されている。現在、災害発生時(地震・噴火などによる災害)における初動対応として無人化施工が適用されており、雲仙普賢岳等で利用されている。

無人化施工技術は、リモコンによる遠隔操作によって建設機械を操作するものが多く、多くの遠隔操作による建設機械が開発されてきた。その中でも、雲仙普賢岳における火砕流被害に伴う噴火後の災害緊急対策として、遠隔操作による除石・対策工事(掘削・積込み・運搬・敷き均し・転圧)といった無人化施工が現在も進められている。

本研究では、雲仙普賢岳での無人化施工に利用されている遠隔操作技術と国土交通省での総合プロジェクト(平成17~19年度)「ロボット等によるIT施工システムの開発」によって研究開発された操作システムに関して、操作性等に関する比較検証実験の結果とオペレータの遠隔操作技術に関する技術的ニーズについて報告するものである。

また、建設機械による搭乗操作と遠隔操作について、作業効率・安全性確保の観点から考察し、今後の遠隔操作による機械施工の汎用性・普及に向けた具体的な方策について述べる。

2. 研究内容

本研究では、土木研究所において研究開発された油圧ショベル(写真1)におけるIT施工システムをベースに操作性に関する検証実験を実施したものである。



写真1 検証実験に必要な機器構成

検証実験は遠隔操作(ここでは、IT施工システムによる遠隔操作を「施工操作システム」という)と雲仙普賢岳での無人化施工に利用されているシステムを模したシステム(ここでは、「雲仙システム」という)及び直接目視による遠隔操作(ここでは、「直視遠隔操作」という)を利用し、掘削作業能力及び掘削精度の比較検証を行った。

また、実験時にオペレータに対して、現行システムの課題、技術的ニーズについて、ヒアリングを実施し、今後の研究開発ニーズに関する具体的方策について検討を進めた。

(1) 遠隔操作システムの構成

遠隔操作システムは、作業中に変化する地形の3次元情報を把握するためのレーザスキャナなどの計測・表示のために必要となる各種センサを取り付けている。

検証実験を進めるうえで必要となるビデオカメラや建設機械自身の位置・状態を把握するためのコンポーネントの機器の構成を写真—1に示す。

次に本検証実験で使用した遠隔操作システムに関する操作支援内容を表—1に示す。ここで、雲仙システムは、雲仙普賢岳で実際に使用されているガイダンスシステムの代わりに土木研究所で研究開発されたIT施工操作システムの断面表示機能を代用して使用するもので、油圧ショベルのキャビン上に設置されている既存のビデオカメラと外部に設置した全景撮影用ビデオカメラで、雲仙普賢岳で使用されている遠隔操作システムを再現したものである。

表—1 遠隔操作システム

システム名	操作形態		丁張り	建機カメラ		外部カメラ	操作画面		
	遠隔	直視		映像	設計形状		建設機械	設計形状	現況地形
施工操作システム	○			○	○		○	○	○
雲仙システム	○			○		○	○		
直視遠隔操作		○	○						

検証実験に使用した各システムに関する留意点として、表—1に示す丁張りについては、掘削範囲のコーナーに設置した。建機カメラについては、写真—1に示すようにキャビン上にビデオカメラを設置し、設計形状の表示・非表示の切替えが可能なものとした。また、操作画面の雲仙システムに関しては、ニコントリンプルのガイダンスシステムを模したものである。

(2) 検証実験オペレータ

本検証実験におけるオペレータは、表—2に示す操作経験者となっている。なお、オペレータは、雲仙普賢岳での実施工に従事しており、雲仙システムに慣れていることから、現行システムの課題、技術的ニーズについて、ヒアリングを実施した。

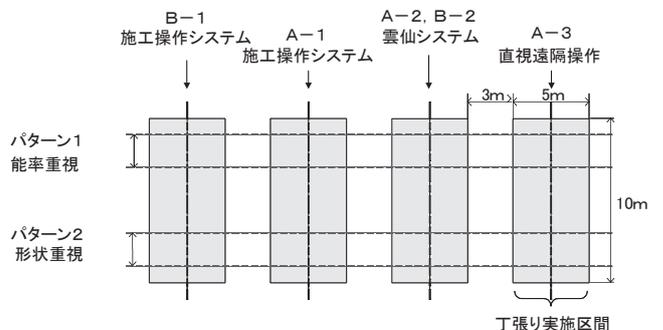
表—2 オペレータ経験

オペレータ	年齢	遠隔操作経験	建設機械操作経験
A	39歳	6年	13年
B	60歳	15年	40年

(3) 検証実験ケース

検証実験は、土木研究所構内建設機械屋外実験場にて実施した。検証実験にあたっては、図—1に示すような検証エリア4区間を設定し、以下に示す流れによって実験を進めた。

- ①検証エリアに対応する設計データを準備
- ②検証エリアのマーキング (図—1)
- ③検証エリア A-3 について丁張り
- ④掘削開始位置に油圧ショベルを設置



図—1 検証エリア

検証実験ケースについては、表—3に基づくものとした。パターン1に関しては、作業能率重視とした検証実験ケースで、パターン2に関しては、形状重視(仕上り)とした検証実験ケースである。いずれも、バケット幅2回分の溝掘削とした。

表—3 検証実験ケース

オペレータ	パターン	遠隔操作システム		
		施工操作システム	雲仙システム	直視遠隔操作
A	1	A-1-1	A-2-1	A-3-1
	2	A-1-2	A-2-2	A-3-2
B	1	B-1-1	B-2-1	-
	2	B-1-2	B-2-2	-

(4) 検証実験の実施

図—1に示す検証実験箇所に対して、それぞれのシステムに関して検証実験を実施した。

①施工操作システムによる掘削作業

遠隔操作室にある操作画面(ビデオ映像、平面及び断面表示画面)を確認しながら掘削作業を実施した(写真—2)。



写真一 2 施工操作システム



写真一 4 直視遠隔操作

②雲仙システムによる掘削作業

施工操作システムの設計地形を非表示としたビデオ映像と設計形状のみを表示した断面表示画面及び外部に設置したビデオ映像を確認しながら掘削作業を実施した(写真一 3)。



写真一 3 雲仙システム

③直視遠隔操作による掘削作業

遠隔操作室の屋上より、直接掘削箇所を確認しながら油圧ショベルによる掘削作業を実施した。掘削時における出来形の確認に関しては、丁張りを活用した(写真一 4)。

④データ計測及び整理

掘削出来形の計測は、各種検証実験ケースにおいて掘削した地形を測量する。測量には、3級トータルステーションを利用した。

各出来形計測値から掘削量を算出し、掘削効率を整理した。

また、各種検証実験ケースにおいて、撮影したビデオ映像より、溝掘削1サイクルを各動作に分けて、それぞれのタイムを整理した。

次に掘削作業能力(作業能率)の確認として、サイクルタイム計測結果から、各種システムにおける実現場で使用されているシステムの課題を整理した。

掘削作業の精度の検証に関しては、各溝の両端の断面における出来形実測値の設計差異と現行の出来形管理基準値と比較、データ整理をした。

3. 検証実験結果及び考察

(1) 掘削試験結果

掘削試験において、溝掘削1サイクルの動作ごとに平均サイクルタイムを整理し、本検証実験結果を以下のようにまとめた。

- ①各システムにおいて、能率重視作業に対して形状重視作業の方が、作業時間が長くなる傾向となった。
- ②「掘削+水平引」について、オペレータ A は施工操作システムよりも雲仙システムの方が、サイクルタイムが2 sec 程度早い。これに対して、オペレータ B は施工操作システムの方が1 sec 程度早い結果となった。

(2) 掘削作業能力に関する結果と考察

①施工操作システムと既存システムとの比較

「バケット接地」に着目すると、オペレータ A, B ともに施工操作システムに対して、現場で利用されている雲仙システム及び直視遠隔操作は、作業が早い傾向にある。これは、施工操作システムの場合、操作画面上に重ね表示された設計形状を示す線にバケットの刃先を合わせることにオペレータが慎重に油圧ショベルを操作しているためと考えられる。また、「バケット接地」の前の動作である「旋回」による位置決め誤差の大小(旋回のし過ぎ等)もサイクルタイムの差に関係すると考えられる。この位置決め誤差の大小

(旋回し過ぎ等)には、油圧ショベル搭載のカメラの画角が狭いことが影響していると考えられる。

また、「掘削+水平引」では、オペレータ A は施工操作システムよりも雲仙システムの方が2sec程度早いですが、オペレータ B は IT 施工操作システムの方が1sec程度早いことから、能率重視作業でも形状重視作業でも同様な傾向であることが分かった。

また、オペレータ A と B のサイクルタイムを比較すると、雲仙システムではオペレータ A の方が B よりも3sec程度早いですが、施工操作システムでは全体的に見てオペレータ B の方が A よりも早くなっている。したがって、施工操作システムへの慣れの度合いや経験値の違いが関係しているものと考えられる。

以上により、本検証実験結果から考察される施工操作システムのインターフェイスの課題として、ビデオ映像に重ね合せ表示される設計ラインにバケット刃先を合わせる操作に対する支援という課題が考えられた。

②掘削作業量と掘削時間による実作業能力比較

掘削作業量(測量結果から算出)と掘削時間から算出した作業能力を図-2, 3に示す。

とりまとめ結果は、以下のとおりである。

- (a) オペレータ A は、能率重視作業および形状重視作業において、施工操作システムよりも雲仙システムの方が、作業能力が高い。
- (b) オペレータ B は、能率重視作業および形状重視作業において、施工操作システムの方が雲仙システムよりも、作業能力が高い。
- (c) 能率重視作業では、施工操作システム(オペレータ A, B)と雲仙システム(オペレータ B)の掘削作業量は同程度であるが、これに対して雲仙システム(オペレータ A)の掘削作業量は約1.4倍と差がある。しかし、形状重視作業では、

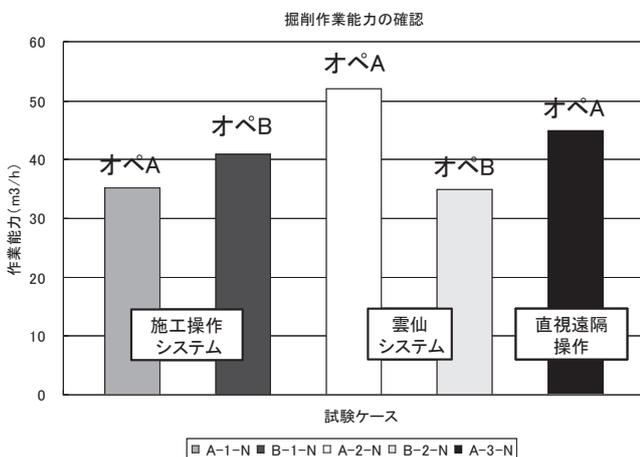


図-2 能率重視作業

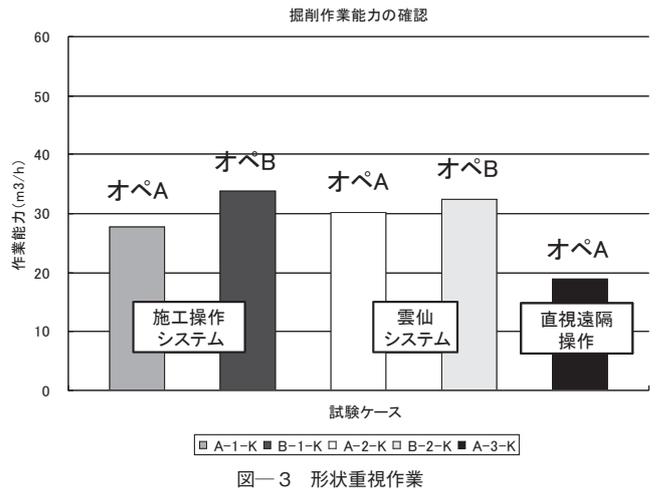


図-3 形状重視作業

施工操作システム(オペレータ A, B)と雲仙システム(オペレータ A, B)の掘削作業量に大きな差は見られなかった。

(3) 掘削作業精度

各試験ケースで掘削した溝の両端の断面について、標高、中心離れ、幅員、法長の設計差異を計測整理した。ここで、通常の施工規格値は、以下のとおりである。

- ・標高 ± 50 mm
- ・幅員 - 100 mm 以上
- ・法長 - 200 mm 以上 (法長 L < 5 m)

標高は各溝の両端断面の法尻の設計差異である。法肩は、設計に使用した基準地面の標高と実際の地面の標高にずれがあったので、本試験では法尻の標高のみを評価に使用した。

本結果をまとめると以下のとおりである。

- ①標高について、能率重視作業ではオペレータ A は直視遠隔操作の1点を除き、規格値内に入っていないが、形状重視作業では施工操作システムは全て規格値内に入っていた。また、オペレータ B は施工操作システムの場合、能率重視作業および形状重視作業ともに4点の内3点が規格値内に入っているが、雲仙システムの場合、能率重視作業では4点の内2点が規格値外、形状重視作業では4点の内3点が規格値外であった。
- ②中心離れを見ると、施工操作システムの場合、能率重視でも形状重視でも設計差異に大きな変化がない(精度が低下していない)ことがわかった。
- ③法長について、規格値外となったのはオペレータ B の施工操作システムの形状重視作業の法長と雲仙システムの能率重視作業の法長であった。
- ④幅員について、規格値外となったのはオペレータ A の施工操作システムの能率重視作業の幅員と、オペ

レータ B の施工操作システムの能率重視作業の幅員と雲仙システムの能率重視作業と形状重視作業の幅員であった。

オペレータ A に着目すると、能率重視よりも形状重視作業の方が、精度がよくなっていることがわかった。

以上の結果から、各システムの検証結果として、形状重視に関しては、オペレータの技量による部分が高く、概ね全てのシステムに関して精度の高い掘削作業が行われていた。一方、能率重視に関しては、掘削形状を短時間で把握して作業を進めるうえで、設計線が提示されている施工操作システムが有意のものとなっており、施工時におけるオペレータへの情報提供の必要性を感じることができた。

4. オペレータへのヒアリング

本検証実験と同時にオペレータに対して、各システムにおける操作性や今後の現場作業において必要とする技術についてヒアリングを実施した。

その結果を以下にまとめた。

- ①遠隔操作については、外部カメラからの全景が確認できるシステムは、作業を円滑に進めるうえで必要なものと考えられる。
- ②施工操作システムについては、操作しやすいシステムであった。特に設計断面の表示については、施工を円滑に進めるうえで必要機能だと考えられる。
- ③バケット先端部の作業状態が確認できるように広角機能が望まれる。
- ④実現場では、操作経験者（10年以上）を中心とした施工体制となっており、経験に基づく行動パターンを予測したうえで作業している実情がある。
- ⑤単純作業については、ある程度の自動化された機能が望まれる。

5. まとめ

各システムに関する検証実験を進めてきたが、施工操作システムが効果的であることが、能率重視とした施工実験で明らかとなった。これは、出来形の目安となる断面形状が提示されていることに関係があり、平面情報であっても有効なものであることがわかった。

また、オペレータに対するヒアリングより、検証した各システムの優位性に関しては、施工操作システムが良好であるとの評価を得たが、操作経験者による行動の予測が施工精度や効率に大きく寄与することも把握できた。

したがって、今後の取組としてオペレータの習熟プロセス、空間認識能力の実態を把握し、遠隔操作に必要な機能抽出を図る必要があるものと考えられる。

謝辞：本研究を実施するにあたり国土交通省、ロボット等による IT 施工システム研究委員会（委員長：筑波大学油田教授）、東京大学人工物工学研究センター浅間研究室、(社)日本建設機械化協会、(財)先端建設技術センター、土木学会建設用ロボット委員会、建設無人化施工協会をはじめ多くの方々にご指導頂きました。お礼申し上げます。また実験にご協力いただいた方々に感謝いたします。

JICMA

【参考文献】

- 1) 茂木正晴・山元弘・大槻崇・邵輝：(財)土木研究センター、土木技術資料／第 51 巻 6 号、2009.6
- 2) 山元弘・柳沢雄二・野末晃・邵輝・境田右軌・山口崇：油圧ショベルの自律化に向けた基盤技術について、建設ロボットシンポジウム論文集、pp.243-252、2008.9

【筆者紹介】

藤野 健一（ふじの けんいち）
 (独)土木研究所
 技術推進本部 先端技術チーム
 主席研究員



茂木 正晴（もてき まさはる）
 (独)土木研究所
 技術推進本部 先端技術チーム
 主任研究員



大槻 崇（おおつき たかし）
 (独)土木研究所
 技術推進本部 先端技術チーム
 研究員

