

15. 無人化施工における無人測量システムの開発

開発経緯と改良型システムの導入結果

(株) フジタ	九州支店土木部	○橋詰 亮
(株) フジタ	土木エンジニアリングセンター機械部	浅沼 廉樹
(株) フジタ	土木エンジニアリングセンター機械部	三鬼 尚臣

1. 序論

平成2年11月、198年ぶりの噴火活動によって島原市を中心に大きな被害を与えた雲仙・普賢岳。復興が進んだ現在もなお、溶岩ドームの崩落や土石流による被害が想定される水無川流域では立ち入りが禁止された警戒区域が設定されている。

警戒区域内での災害復旧工事は、安全な場所から建設機械を遠隔操作し、施工を行う無人化施工で行われている。

雲仙・普賢岳における無人化施工は、平成5年の試験フィールド制度として採用されて以来、除石や砂防ダムの工事を経て改良、発展してきた。

無人化施工が開始された当初、測量作業については、無人化が難しく人が警戒区域内に立ち入り行っていた。株式会社フジタでは、遠隔にて測量を行い、位置出しを可能とする無人測量システムの開発、導入を行った。

本稿では、雲仙・普賢岳における無人化施工に導入されてきた無人測量システムの開発経緯とその改良型システムの導入結果を述べるものである。

2. 無人測量システム開発経緯

無人測量システムが導入された水無川2号砂防ダム工事でのダムの構築は、CSG工法、RCC工法を用い無人化施工にて実施された。水無川2号砂防ダム工事での測量作業は、1) 掘削管理用丁張り出しと測点位置だし、2) 盛土・切土管理用丁張り出し測点位置だし、3) 土砂型枠施工位置管理、4) 出来形管理などがある。これらの測量作業を無人化施工で行う必要があり、安全な位置に設置されたコントロールルームより遠隔にて行うために無人測量システムは開発された。特に、砂防ダム工事の土砂型枠施工時に必要なRCCコンクリート上の測点の位置出しを遠隔にて行う技術、出来形の高さを計測する技術に重点を置いて開発された。

3. 無人測量システム概要

当社では、現在までに3台の無人測量システムを開発し現場に導入してきた。(写真-1) 水無川2号砂防堰堤工事において1号機による実証実験を実施し、その後、測量精度の向上や測量時間の短縮を計るため、微小位置決め操作が容易に出来るXYテーブル機構を搭載した2号機を、赤松谷川2号砂防ダム工事に導入・運用を行った。



1号機



2号機



3号機

写真-1 無人測量システム

そしてマーキング方式を新たにした 3 号機が 5 号床固工工事に導入され、現在稼働中である。

3. 無人測量システム（1号機，2号機）概要

無人測量システムは、マーキング機構を有し、警戒区域内での出来形測量，土砂型枠やブロックなどの据付を行うため位置だし作業を遠隔にて行うシステムである。構成図を図 1 に示す。主な構成は、①マーキング機構、②トータルステーションシステム、③制御ユニットの 3 つの部分で構成されている。無人測量システムの概要図を図-1 に示す。計測は追尾式トータルステーションにて行い、現地にマーキングを残す。無人測量システムの操作は、他の遠隔施工重機と同様にコントロールルームにて行われる。

3.1 マーキング機構

マーキング機構は、無人操縦可能なバックホウアタッチメント部分取り付けられている。その制御ユニットは重機運転席後部に設置してある。2号機では、微小位置決め操作が可能な XY テーブル機構を採用した。

マーキング方式は、逆さに噴射が可能なスプレー缶を用いて行われる。写真-2 にマーキング機構を示す。スプレーの搭載されるマーキング機構（Z 軸）の最上部には全周プリズムを搭載し、ユニバーサル機構により鉛直を保つ構造となっている。Z 軸を下降させ地面と接地させ、φ100mm のマーキングを行う。

3.2 トータルステーションシステム

トータルステーションシステムは、マーキング機構に取付けられた全周プリズムを自動追尾することで目標マーキング点に誘導を行うシステムである。自動追尾中は、プリズムがアームなどで隠れた場合にも、自動でサーチを行うため、警戒区域内での無人測量が可能となっている。本システムでは、無線による測定命令とデータ取得機能により、遠隔にてトータルステーションの制御を行うことができる。また 2 号機では、トータルステーションに代わり、GPS を使用しての測量も可能となり、トータルステーションの追尾の届かない場所での作業も可能となった。



写真-2 マーキング機構

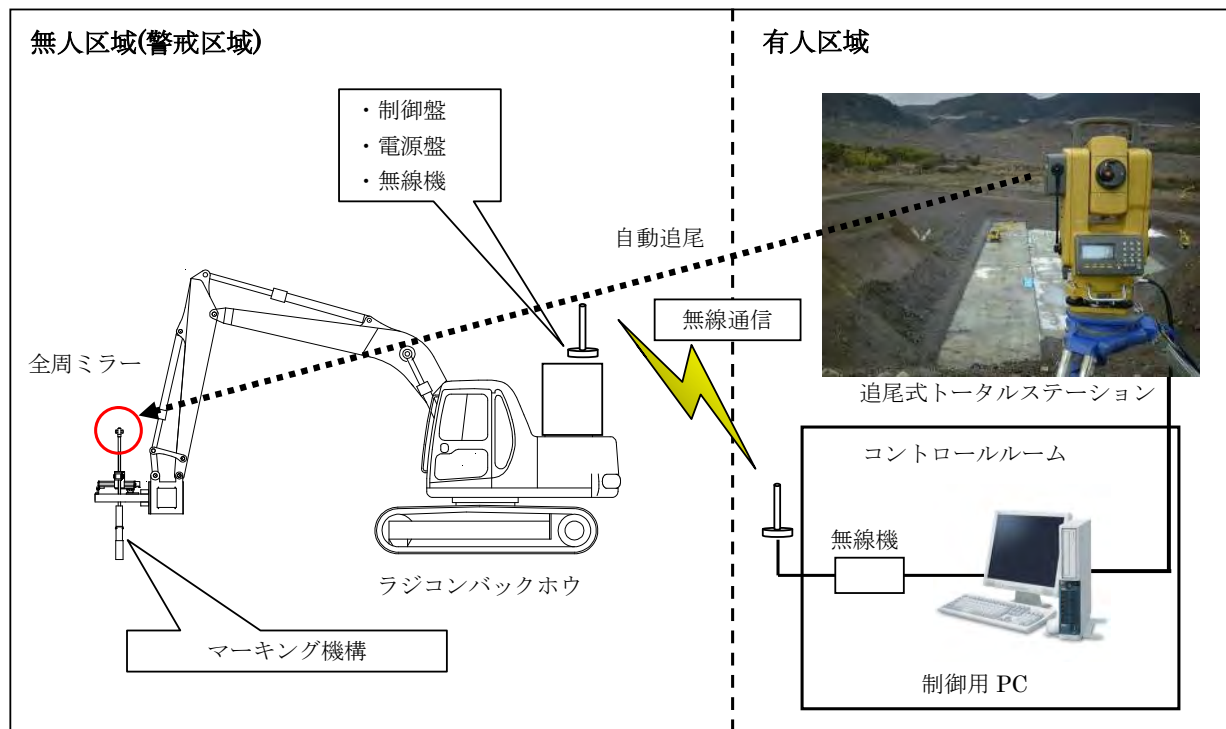


写真-1 無人測量システム概要図

3.3 制御ユニット

制御ユニットでは、トータルステーションシステムからの測量データをパソコンモニター上に表示させることで、目標マーキング点へ誘導を行う。また、2号機では、バックホウでの大まかな誘導後、微小位置決めデータの計算を行い、XY テーブルによって目標マーキング点へ自動誘導を行う。



写真-3 XY テーブル機構

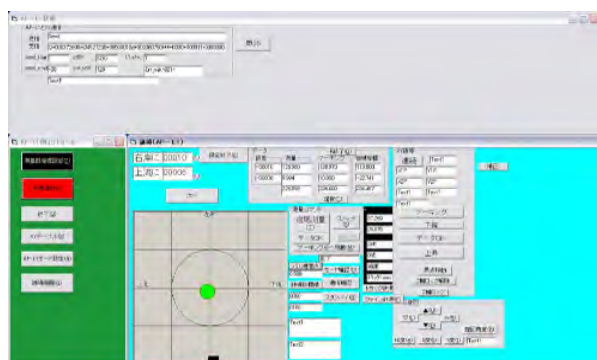


図-2 誘導画面

4. 改良型無人測量システム（3号機）の開発

無人測量システム 2 号機は、長年にわたり現場に導入・運用され、トータルステーションと GPS とのハイブリット化や、使用無線機器の変更などのマイナーチェンジが行われてきた。しかし、経年劣化により動作が不安定になってきたこともあり、新規リニューアルを行った。リニューアルを行うにあたり、

- 1) ベースマシンの占有回避
- 2) システム簡略化による安定動作
- 3) マーキング方式の変更
- 4) 測量精度の向上

を目指した。

無人測量システムは、着工前測量から完成検査での出来形測量までの工事期間中ベースマシンを占有していた。測量時以外には施工機として使用するために、バケットと測量システムの付替えが容易なものとする。

4.1 改良型無人測量システムの概要

改良型無人測量システム概要図を写真-4 に示す。ベースマシンは従来までの0.45m³級バックホウから、無人化施工で一般的に使用される 0.8m³ 級バックホウとし、施工機械としての汎用性を高めた。アタッチメントは、ベースマシンから取り外した時に自立する形状とし、制御ユニットもアタッチメントに全て集約している。また 2 号機では、誘導を自動制御にて行っていたが、新システムでは、自動制御から、ON-OFF 制御とした。ON-OFF 制御とすることで、プログラムを軽く、簡略化することができ、より速く誘導を行えることが可能となった。

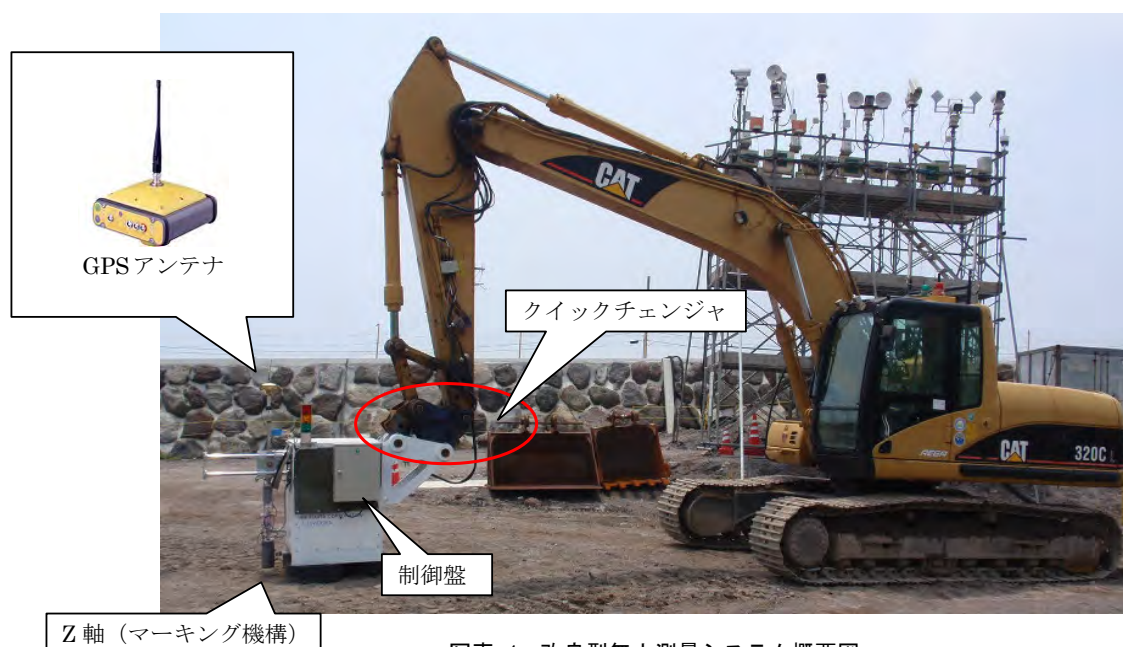


写真-4 改良型無人測量システム概要図

アタッチメント部には油圧駆動のクイックチェンジャシステムを搭載しており、バケットと無人測量システムの迅速な交換を可能にしている。

マーキング機構もこれまでの XY テーブル方式から、回転するアーム上を Z 軸がスライドし、目標点まで移動する rθ 方式とし、マーキング方式も新たにコンプレッサを搭載し、自動スプレーガンによるマーキング方式となった。

写真-5 に改良型無人測量システムを、表-1 に改良型システム仕様を示す。計測は GPS と追尾式トータルステーションのどちらでも可能となっている。



写真-5 改良型システム

表-1 改良型システム仕様

ベースマシン	0.8m ³ 級バックホウ
無人測量システム	rθ 方式
寸法	800×800×1100
アームストローク長	400mm
回転角度	90°
アーム送り速度	25mm/s
回転速度	0.5° /s
供給電源	100V
マーキング方式	自動スプレーガン
マーキング径	φ100mm
搭載コンプレッサ	最大 0.7MPa
塗料容量	600cc
計測システム 1	自動追尾式 TS
計測システム 2	GPS GR2100

4.2 誘導機構

3号機の誘導機構は、従来の XY テーブル方式から rθ 方式に変更している。従来方式では、自動誘

導を行っていたため、XY スライダーによって位置決めを行っていたが、改良型システムの簡略化に伴って rθ 方式とした。図-3 に示すように、rθ 方式では、稼働範囲を広く取ることが出来る。また構造物の際の測量を行う場合にフレームが邪魔にならないといったメリットが挙げられる。

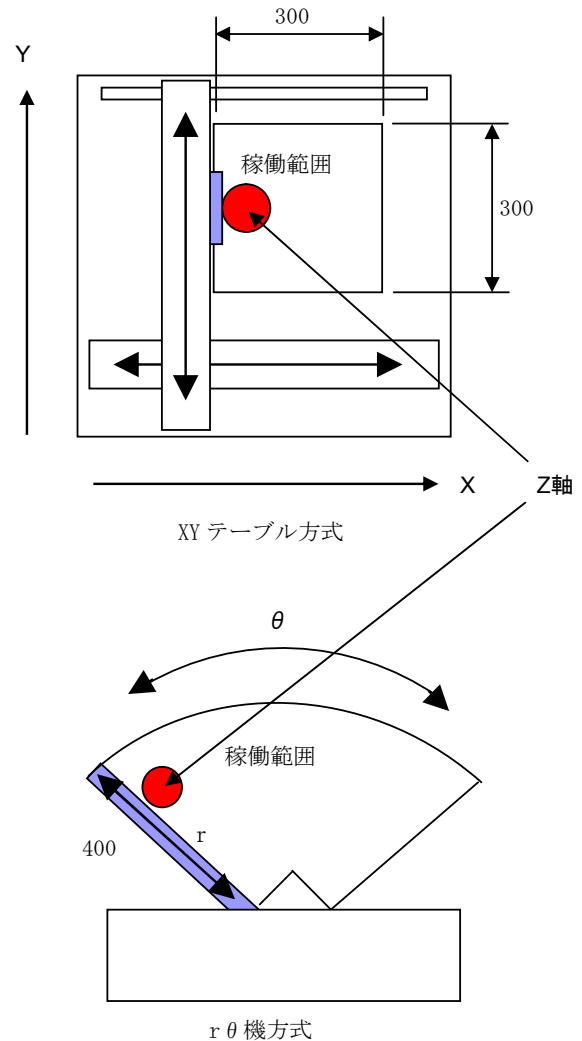


図-3 マーキング機構方式

4.3 マーキング方式

従来の缶スプレーを使用するマーキング方式では、液ダレによって噴出口に塗料が付着し、長時間放置するとスプレーが出来なくなる問題があった。そこで改良型システムでは、新たにコンプレッサを搭載し、自動スプレーガン(噴射ノズル)を用いる方法を採用した。

マーキング機構(Z 軸)には、自動スプレーガン、塗料容器、昇降モータ、ユニバーサル機構から構成されている。Z 軸頂部には、GPS アンテナもし

くは全周プリズムが搭載される。図-4 にマーキング機構(Z 軸)の構成図を示す。本体側に収納されているコンプレッサからのエアによって、スプレーガンへ塗料を導き噴射を行う。スプレーガンのノズルは広角丸型で、 $\phi 0.5\text{mm}$ のノズル径でありながら、 $\phi 100\text{mm}$ のマーキングを可能としている。

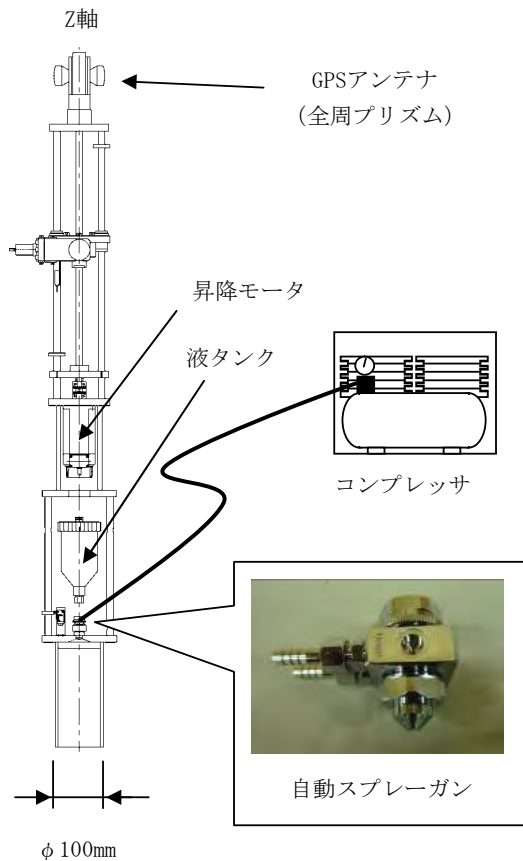


図-4 マーキング機構

4.3.1 使用塗料の決定

使用塗料は試験施工より決定した。試験は、①フェノールフタレイン、②溶剤系着色剤、③多目的水性塗料、④多目的油性塗料の4種類の塗料(溶液)で行った。フェノールフタレイン溶液は、アルカリ性を紅色で示す指示薬で、コンクリートのアルカリ性に反応させ着色させる。溶剤系着色剤は、シンナーで薄め使用した。

それぞれの塗料(溶液)でコンクリート試料にマーキングを行い、評価を行った。評価は、塗料の発色、経時変化、濡れたコンクリート上へのスプレー、取扱性、コストを総合して行った。結果を表-2に示す。

発色が最もよかったのは、水性塗料と、着色剤であった。フェノールフタレインのみ噴射した翌日には、全体的に薄くなっていた。濡れたコンクリート面への噴射では、油性塗料と溶剤系着色剤が優れていた。油性塗料と溶剤系着色剤でシンナーが必要となり、取扱いに注意が必要である。

上記した結果より、発色に優れ水にも強かった溶剤系着色剤を採用とした。また、スプレー缶での問題であった、長時間放置した後のマーキングでも、自動スプレーガンと溶剤系着色剤での組み合わせでは、噴射が可能であることを確認した。

4.4 改良システム導入結果

(1) マーキング精度検証

マーキング精度の検証は、事前に有人測量にて目標点(釘)を打ち、無人測量システムにて誘導、マーキングを行い、目標点とマーキング芯位置との誤差を計測し行った。無人測量システムには GPS (GR2100) を使用し計測を行った。

表-2 塗料試験結果

塗料	フェノール溶液	水性塗料	油性塗料	溶剤系着色剤
噴射高さ	250mm	250mm	250mm	250mm
噴射時間	3 秒	3 秒	3 秒	3 秒
発色	△	◎	○	◎
経時変化	×	○	○	○
濡れた コンクリート	△	×	○	○
取扱性	○	○	△	△
コスト	×	◎	○	○
総合評価	×	△	○	◎

平面誤差分布を図-5に示す。有人にて計測を行った目標点を原点(0,0)とし、無人測量システムによるマーキング点の誤差成分($\Delta x, \Delta y$)を示したものである。分布図の結果より、無人測量システムの平面誤差は15mm以内の範囲に入っていることが確認できた。高さは最大で14mm、平均11mmと良好な結果が得られた。2号機の平面誤差は20mm以内であったが、新システムでは15mm以内と更に精度が向上した。これは、これまでZ軸上方に取付けられていたZ軸昇降モータを、改良型システムでは、Z軸下方に取り付けたことで重心が低くなり、鉛直性が増したことに起因すると考えられる。

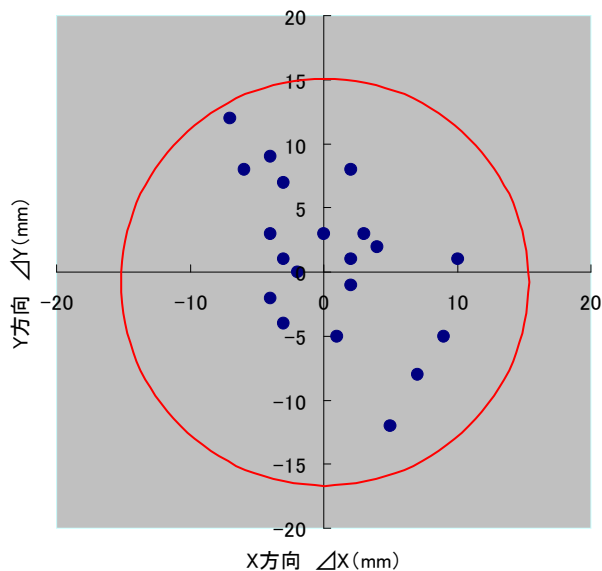


図-5 平面誤差分布図



写真-6 マーキング状況

(2) サイクルタイム

測量時間については、実際に赤松5号床固工事でマーキング測量結果より、1点のマーキングを行うのに、重機移動時間を含め平均1分23秒であった。2号機のマーキング時間が4分23秒であ

ったことから、大幅な施工スピードの向上を図ることができた。これはコンプレッサを用いることで、塗料噴射時間を短くすることができたこと、rθ方式のON-OFF制御としたことによると考えられる。

5. まとめ

無人測量システム1号機から2号機では、XYテーブル機構を付加することで、微小位置決めが可能となり、自動制御により高精度のマーキングを行えるようになった。しかし、3号機である改良型無人測量システムでは、自動制御を行っていたXYテーブル機構を廃止し、新たにON-OFF制御のrθ方式へと大きく機構を変えた。これにより、マーキング精度は維持したまま、施工スピードを大きく向上することが出来た。また、マーキング方式も缶スプレーからコンプレッサを搭載し、自動スプレーガン方式を採用することで、2号機までにあったスプレーノズルの詰まりを回避することが可能となった。

改良型システムの自立する形状や、制御システムの一体化によって、アタッチメントの付け替えが迅速に行うことができ、目標である、ベースマシンの占有を防ぐことも実現した。

現在、雲仙・普賢岳の無人化施工において、位置出し測量や、出来形確認測量は無人測量システムを用いて完全に遠隔で行われている。測量精度はGPS自身の精度に依存する部分が多いが、Z軸の鉛直性の向上により、目標通りの高い精度となっている。

今後は、本システムを更に改良発展させ、測量サイクルの更なる短縮と、雨などの悪条件下での確実なマーキングの実施を目指す。

また、この無人測量システムで蓄積した無人化技術を、今後の無人化施工の品質確保、出来形管理、安全対策などに応用していきたいと考える。



写真-7 施工状況