

吹付け厚さのリアルタイム測定と管理 「吹付けナビゲーションシステム」を開発

新型吹付機「ヘラクレス -Navigator」

四 塚 勝 久

山岳トンネル工事におけるコンクリート吹付け作業は、オペレータが切羽直下で肌落ちの危険や高粉じん下の過酷な労働環境の中で作業をしている。厚生労働省は、山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン及びずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドラインを改正發布している。吹付け作業の安全性と生産性向上に開発主眼をおきトンネル施工会社と吹付けシステム製造メーカーの5社共同研究により開発した吹付けナビゲーションシステムの技術紹介をする。

キーワード：山岳トンネル，切羽，ミリ波レーダ，モーションキャプチャカメラ，吹付けロボット，ナビゲーション

1. はじめに

山岳トンネル工事におけるコンクリート吹付け作業は、オペレータが切羽直下で肌落ちの危険やコンクリート吹付けによる粉じんの飛散など過酷な労働環境の中で出来形を目視確認しながら吹付けロボットのリモコン操作をして作業をしている。厚生労働省は、令和2年に「ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン」を改正し、令和6年には「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン」を改正している。これらのガイドラインにおいては、コンクリート吹付けの遠隔化や自動化技術の導入が求められている。そこで5社共同研究は、トンネル工事切羽作業の安全性と生産性の向上に向けて、吹付け作業の無人化・自動化に関する技術開発を進めている。その中でもリアルタイム吹付け厚さ測定システムを開発の重要な構成要素と位置付けて、吹付けナビゲーションシステムの開発を行った。

2. 開発課題

吹付け厚さをリアルタイムに測定するセンサーは、コンクリート及び急結材が噴射され水分を含む高粉じん環境下において途切れることなく距離測定が可能なもの、また支保工側面や裏面の測定をするためノズル近傍に取付け可能なサイズで耐粉じん性、耐防水性、コンクリート圧送ポンプや吹付けロボットのノズル揺動の影響を受けて常に振動するため耐振動性も必要で

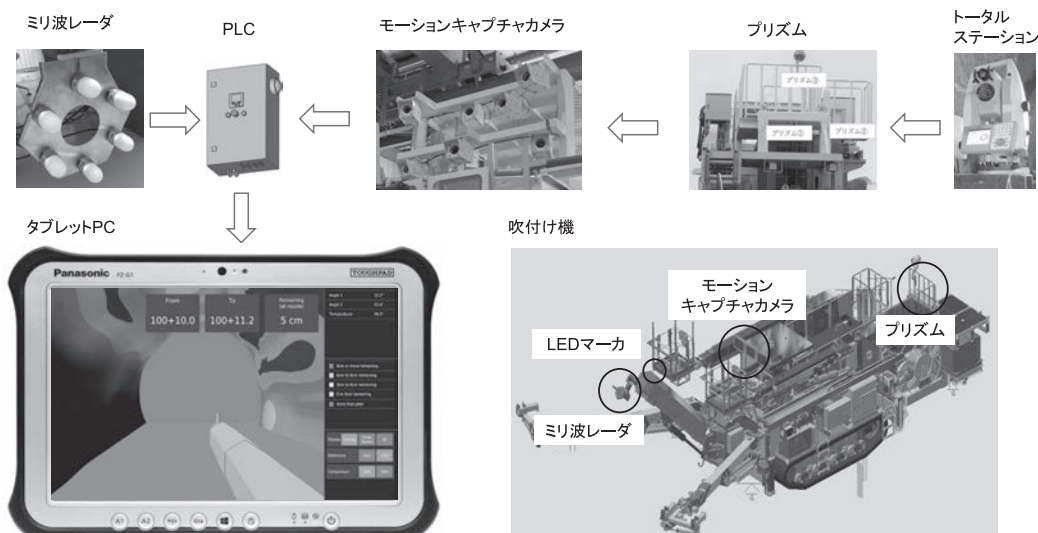
ある。また、厚さは一定のグリッドサイズで吹付け前後の比較をする必要が有るためセンサーの測定焦点が絞れるものが必要となる。吹付けロボットは剛性が高く可動部の位置座標情報の把握、正確で微細な油圧制御ができるものが必要になる。

3. 開発技術の概要

本技術は、吹付け厚さをリアルタイムに測定するセンサーをミリ波レーダとし、吹付けノズル位置座標を正確に測定する技術はモーションキャプチャカメラにて連続的にマーカを測定しノズル位置の補正を行う。吹付けロボットは、剛性の向上と油圧流量調整弁をPLC制御した6軸タイプのロボットを開発した。機体の位置座標は後方に取付けたプリズム3点を測定することで算出する。これらミリ波レーダ、モーションキャプチャカメラ、機体測定の技術を統合計算し切羽でのリアルタイム吹付け厚さ測定の表示が可能となり、タブレットPC画面を見ながらコンクリート吹付けのナビゲーション操作が実現する。図—1に吹付けナビゲーションシステムの概要図を示す。

(1) コンクリート厚さをリアルタイムに測定するミリ波レーダ技術

水分を含む粉じん環境下において途切れることなく距離測定を可能とし、またセンサーは吹付けノズル部周辺に取付けられ測定焦点が絞れるものとして自動車衝突防止などで使用されるミリ波レーダ技術に着目し



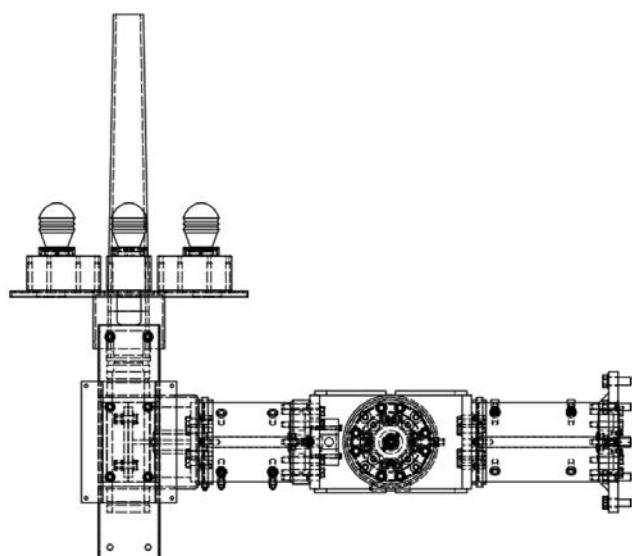
図ー1 吹付けナビゲーションシステムの概要図

た。ミリ波レーダは光学距離センサーに比べると測定環境の影響を受けづらく雨や霧に対する透過性も高い特長が有り吹付け厚さのリアルタイム測定に最適である。新たに開発したミリ波レーダは76 GHz帯の周波数を有し小型でノズル周辺に搭載可能である。ノズルから壁面までの距離を1.5 m～2.0 mとした場合に10 cm×10 cmのグリッドで吹付け面を測定する条件でレーダ照射角度を決め専用のレーダアンテナを採用した。レーダの単体の距離測定精度は1 mm以下と高精度で吹付け厚さの測定には十分な性能を有している。躯体は強靱なアルミ合金製のケースを用いIP等級68とトンネル切羽での吹付け作業に十分耐えられる構造を持っている。これらレーダをノズル部に6ヶ取付け（図ー2）、ノズルの動きに追従して吹付け厚さの測定を行う。ノズル部のミリ波レーダは、吹付け

中にコンクリートの跳ね返りを受けながら測定を連続的に行う。粉じんの中では優れた距離測定性能を示すが、レーダアンテナ部に吹付けコンクリートが堆積するとレーダは遮られて測定ができなくなる。そこでレーダの電波に対して透過性の高いレドーム※を前面に取付けてレドームを回転させる事で吹付け中の跳ね返りによるレーダ部へのコンクリート堆積を防止している（写真ー1）。

（2）吹付けノズル位置をリアルタイムに正確に測定するモーションキャプチャ技術

吹付け作業中はロボットブームの伸縮によるブーム自身のたわみ、圧送コンクリートやノズル動作に起因する揺れが常にランダムに発生する。リアルタイムに



図ー2 ミリ波レーダ搭載ノズル部



写真ー1 回転機構を有したレドーム

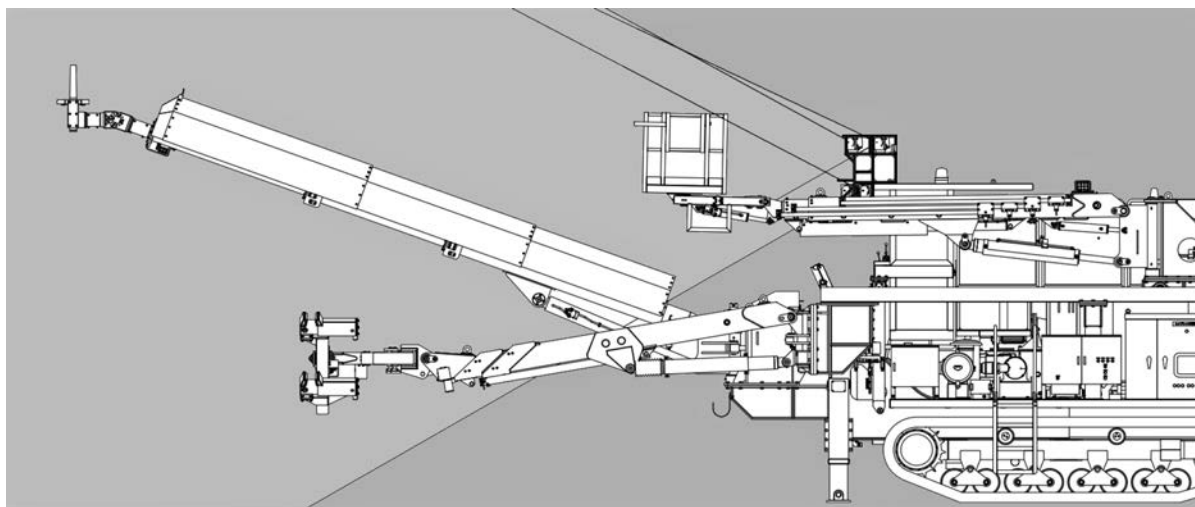
※レドーム レーダアンテナをその構造をもって保護するものであり風、雨、雪、砂、氷、太陽光線などの自然環境からアンテナを保護する役割を持つもの。

正確なノズル位置座標を測定する方法としてモーションキャプチャカメラを導入した。モーションキャプチャカメラは、一般的には雲台に固定され測定対象物を囲むように配置し測定精度を確保する。トンネル工事の切羽作業においては常に切羽は前進するため切羽近傍の壁面に継続的にカメラを設置する事は難しく、また、吹付け作業時にノズル部を囲むようにロボット周辺にカメラを配置する事も難しい。吹付け機に搭載されるモーションカメラは、3DCADによる視野シミュレーションに基づき吹付け機キャビン屋根部に測定範囲と測定精度を確保する向きで配置される（図—3）。ノズル位置座標の測定は、モーションキャプチャカメラは粉じん環境下で動作する必要があるため、それらは鋼鉄製の防じん防水処理を施したケース内に格納し（写真—2）、レンズ全面にはひずみの影響を受けないガラスレンズを配置する。ノズル部に取付けるマークは、ビーズ反射材が塗布された円形マークでは吹付け中に赤外線反射強度が粉じんにより弱くなり見失う事があるため、自発光型4点LEDマーク（写真

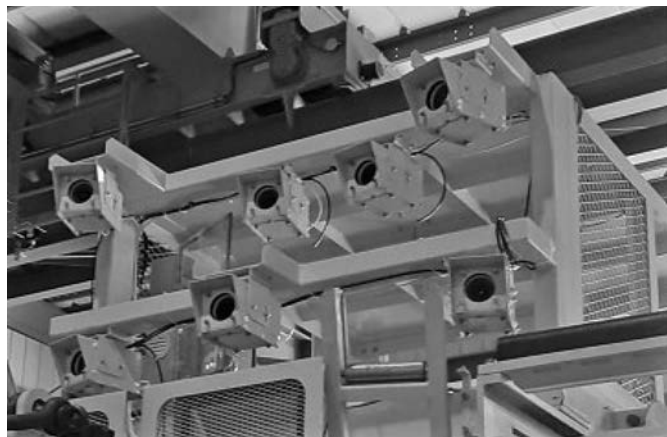
—3）を採用しその中心位置を算出する事で対策した。吹付け中にコンクリートの付着などで4点全てを認識できない場合は、残りのLEDマークにより中心位置を補完する。また、モーションカメラで測定されてノズル位置座標は機体の傾きも考慮し座標計算を行う。

（3）吹付けロボットの剛性の向上と油圧制御をPLC制御化する技術

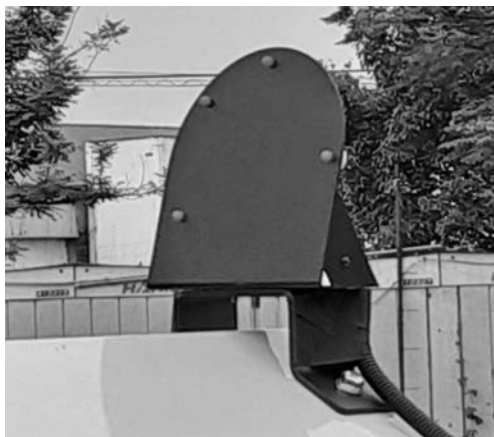
吹付けロボットは今後の自動化も考慮し新規に6軸タイプのロボットを開発した（図—4）。従来型のロボットに比べ剛性をアップさせ、ヒンジ部のはめ合い誤差を少なくしロボットの組付け精度を向上させた。また、全長9.5mに伸びるロボットは、各可動部に角度センサーと粉塵環境下でのセンサトラブルを未然に防ぐ特別に設計した伸縮計を内蔵した油圧シリンダーを採用する。また、油圧流量調整弁をPLC（プログラマブルロジックコントローラ）（写真—4）により正確で繊細なロボット制御を可能としている。



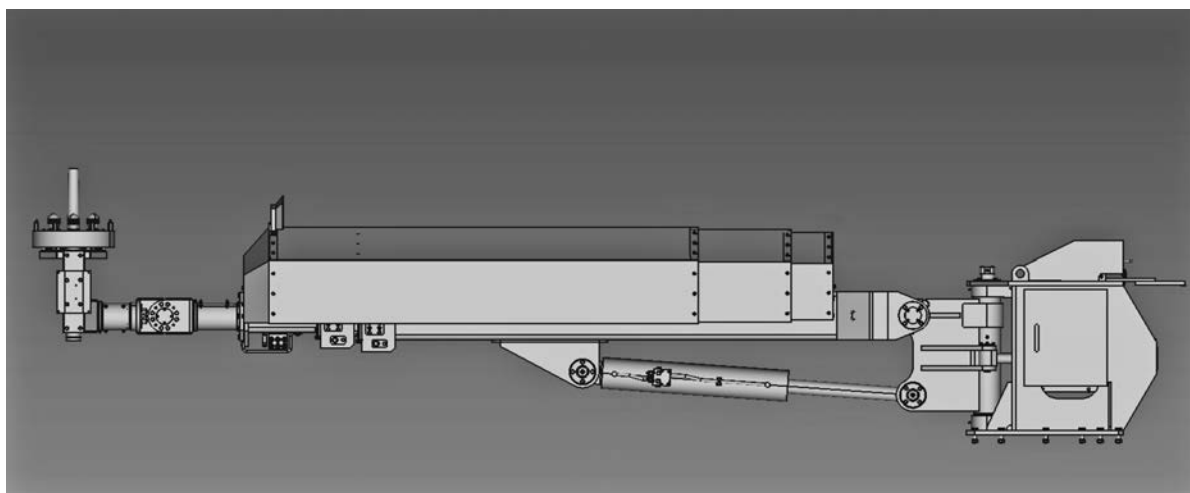
図—3 モーションキャプチャカメラ視野シミュレーション



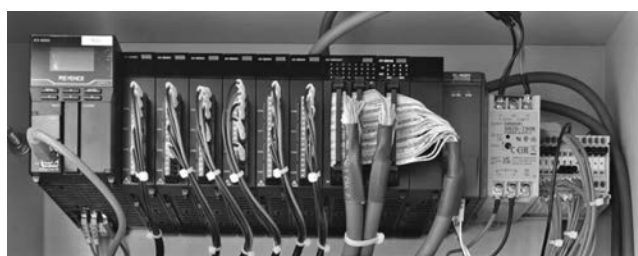
写真—2 防じん防水ケース内に格納したカメラ



写真—3 LED マーク



図—4 新型 6 軸吹付けロボット



写真—4 吹付けロボット制御用 PLC (プログラマブルロジックコントローラ)

(4) 機体の位置座標測定技術

切羽に移動停止した機体は、機体後方に設置したプリズム 3 点 (写真—5) を坑内に設置されたトータルステーション (写真—6) で順に自動測定し位置座標及び傾きを測定算出する。

4. リアルタイム吹付け厚さの測定

機体に 400 V が接続されるとシステムは自動起動する。オペレータは、操作室より機体測定の実行を行う。

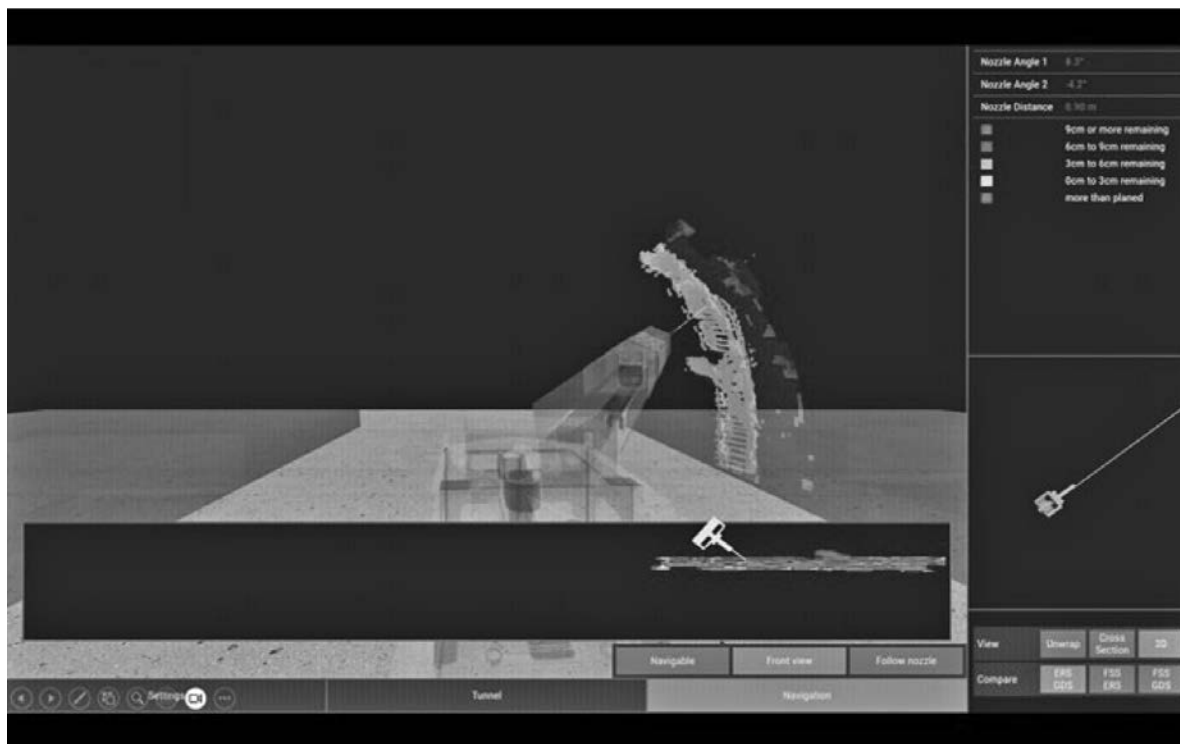
坑内 Wi-Fi を通して後方に設置されたトータルステーションは操作室からの信号を受け取り、機体後方に設置されたプリズム 3 点を順に測定する。測定後機体の座標及び傾き情報を算出し、また切羽における設計断面情報と共に測定データを機体に搭載している PLC に送信する。PLC が受信した情報を基にモーションキャプチャカメラシステムはカメラ基点及び機体の傾きを把握しノズル部に設置した LED マーカを測定開始しノズル部の位置座標データを送信する。ノズル部に搭載したミリ波レーダ 6 ケは同時に測定準備に入り、タブレット上では吹付けナビゲーションシステムソフトウェアが起動する。ソフトウェアは機体の位置座標、切羽座標、ロボットに組み込まれた角度計、伸縮計のデータ及びモーションカメラで得られるノズルの位置座標データとレーダから得られる距離データの統合計算を行いタブレット PC 画面上に吹付け厚さをリアルタイムに表示する (図—5)。吹付け厚さの色付け表示は、予め設定した凡例に基づき色づき表示さ



写真—5 プリズム



写真—6 トータルステーション



図ー5 吹付けナビゲーションシステムソフトウェア

れ吹付けの増し吹きが必要な箇所が画面上で確認できる。吹付け中のコンクリート堆積を防ぐレドームは、コンプレッサの起動、坑内の水接続と同時に機能を発する。

5. まとめ、展望

吹付けナビゲーションシステムを搭載したエレクタ一体型吹付機（写真ー7）は、現場導入も進めており、新たな改良を検証作業と共に進め、より安全で生産性の高い開発を継続して進め、広く現場導入されるように普及を図る。



写真ー7 吹付けナビゲーションシステム搭載機

6. おわりに

技術的支援、検証現場並びに機材の提供をして頂いた共同研究開発メンバーである清水建設(株)、戸田建設(株)、西松建設(株)、前田建設工業(株)の皆様に感謝いたします。

J C M A

《参考文献》

- 1) 清水建設(株) 小島英郷ほか：山岳トンネル吹付けロボットのリアルタイム厚さ測定システムの開発，土木学会 第76回年次講演会，2021
- 2) 前田建設工業(株) 水谷和彦ほか：山岳トンネルにおけるコンクリート吹付けナビゲーションシステムの開発，土木学会 第78回年次講演会，2023
- 3) 西松建設(株) 山下雅之ほか：山岳トンネルコンクリート吹付けの遠隔操作システムの開発，土木学会 第77回年次講演会，2022

【筆者紹介】

四塚 勝久（よつづか かつひさ）
エフティーエス(株)
特機営業部
次長

