

## トンネル覆工セントル用の磁力吸着走行機の開発

佐藤工業 正会員 ○北川拓弥 大江隆史 京免継彦  
 正会員 前田幸男 伴 享  
 東海大学 稲垣克彦

## 1. 研究背景と目的

一般的に、山岳トンネルの覆工コンクリートの打設はセントル外面と地山間の狭い曲面の空間で行われる。コンクリート打設作業や巻き厚検測などは、セントルに設置されている数カ所の検査窓より行われるため、窓の開閉が伴う作業となる。また、検査窓数は品質確保提案の観点から近年増加している。

検査窓からの作業は狭い曲面空間であるため、視認が困難となることや狭いセントル内での重い検査窓の開閉操作は労力を要し、危険が伴うことから、窓数および開閉回数は覆工品質・出来映えや作業性・安全性に大きく影響するといえる。しかし、現状セントルの検査窓は不可欠なものであり、窓数・開閉回数を減らすことは、種々の不都合が生じることとなる。

そこで、各種作業をロボット化することにより、不都合を生じさせることなく窓数を減らすことを目的として、厚さ30cm程度の狭い曲面空間のセントル外面上を自在に移動できる機体の開発に着手した。

ここでは、セントル面を磁力吸着して走行する機体の開発経緯、試作機の概要、試作機の走行テスト結果について報告する。

## 2. 走行機の仕様設計

山岳トンネルの覆工コンクリート打設では、地山とセントルの間の空間で巻き厚検測やコンクリート打込み、締固めといった様々な作業が行われる。

これらの作業を想定し、セントル外面上の曲面空間を移動する走行機の目標仕様を表-1 および写真-1のように設定した。なお、当初設定では、搭載能力が大きい機体を設定したため、搭載物が小さな装置で、小型高速走行の機体などは、次段階の目標とした。

壁面に吸着走行する機体は、負圧吸引(吸盤)方式や磁力吸着方式等が挙げられる。セントル面は、大半が鋼製であり永久磁石が吸着(何もせずに張り付く)

することや磁力吸着方式の採用事例<sup>1)~4)</sup>も多いことから、磁石車輪を用いた走行機の開発に着手した。

表-1 設定目標仕様

仕様	設定目標
寸法	高さ20cm程度以下(覆工厚30cmを対象)
	長さ40cm, 幅40cm程度以下
重量	20kg以下
曲面走行性	曲率、部材突合せ部の凹凸や剥離剤や表面汚れに対しても吸着可、スプリングライン下方(仰角90°以上)でも走行可
牽引・吊下げ能力	20kg程度
無線操作	曲面空間での走行なので無線を前提
走行速度	牽引・吊下げ能力優先とし、設定せず

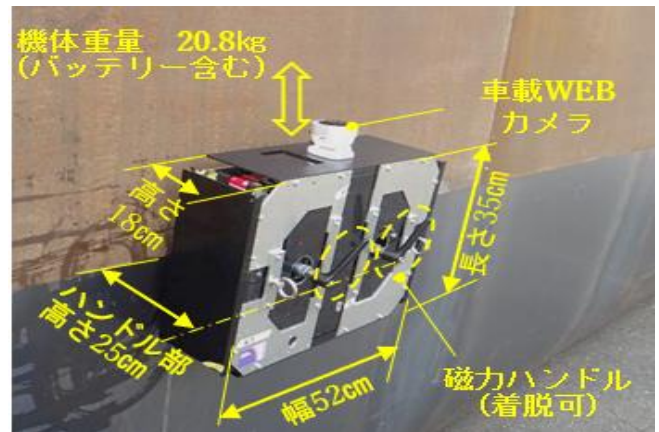


写真-1 走行機目標仕様

## 3. 設計機構および制御システム

## 3.1 磁力走行機の設計機構

開発した走行機は、磁石の車輪機構を有するマグホイールと呼ばれる全体が磁石になっている車輪を採用した。同車輪は回転可能な磁石と磁性体・非磁性体を組み合わせる事で磁束の流れを変更し、金属に対する吸着力のON-OFFを切り替える事ができる構造である。

設計機構としては、前述の車輪を2組(4輪)用い、

キーワード セントル, 磁力吸着走行, 磁力車輪, 省人化施工

連絡先 〒300-2658 茨城県つくば市諏訪 C30 街区 1 佐藤工業技術センター TEL:029-817-5100

個々に DC モータを取り付け、それぞれ能動的に動作する構造としている。

4 個の車輪の配置は、その場で旋回が可能のように直線上に配置している。さらに、4 車輪が常にセントルに接地する事が可能なように、車台が車軸に対して水平法線方向の軸回りに受動的に回転できる構造としている。これにより、曲面状のセントル表面において、車輪が接地面から離れ吸着力を失うのを防ぐ仕組みとなっている。

### 3. 2 制御システム

4 個の車輪は 150W の DC モータを用い、タイミングベルトを通じて能動駆動する。DC モータはサーボモジュールを用いて速度制御を行っている。これらのサーボモジュールは I<sup>2</sup>C を用いて走行機中央部分に設置したマイクロコントローラ (MPU) から速度指示を受ける仕組みになっている。この MPU には ZigBee を用いた無線接続のジョイスティックが接続できるようになっており、遠隔操縦が可能である (図-1)。

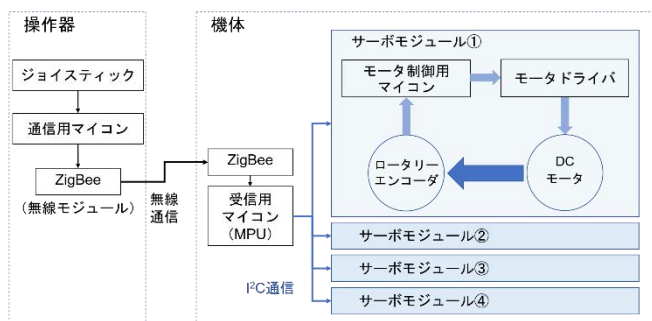


図-1 制御システム

### 4. 実験結果

曲面走行性を確認するため、実機セントルを用いた走行テストを 2021 年 4 月と 10 月の 2 回、屋外で行った。1 回目は、有線・無線操作併用方式で実施し、2 回目は、機体や無線機能等を改良して実施した (写真-2)。

その結果、走行時の機体の落下やスリップ等は見られず、速度は約 0.11 m/sec となることが確認された。コンクリート剥離剤の塗布面上の走行もスリップがないことが確認された。また、剥離材塗布面上の走行においても、10kg の錘を吊下げた状態で走行できることが確認された。なお、別途実施の剥離剤なしでの平面垂直鋼製面の吊下げ能力の試験では、最大 20kg の錘を吊下げ停止動作が確認された (写真-3)。



写真-2 セントル円周方向走行状況

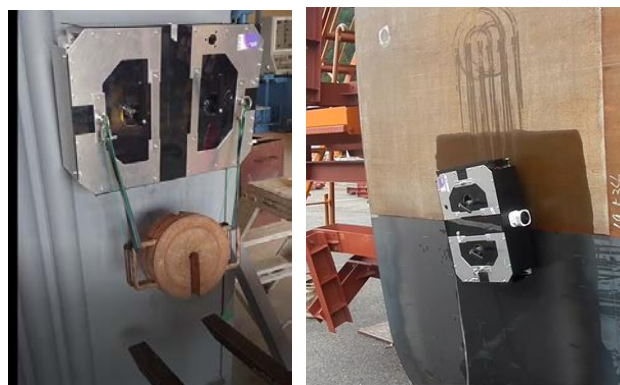


写真-3 左: 20kg 錘吊り下げ停止  
右: 剥離剤塗布面走行状況

### 5. まとめ

トンネル覆工における各種作業のロボット化を目的に、セントル面に磁力で吸着して移動する走行機を開発した。走行テストの結果、設定目標仕様をほぼ満足することができ、本システムのロボット機体としての有効性が確認された。

今後は、当社開発技術である「覆工の自動化」<sup>5)</sup>と統合して、トンネル覆工の省力化・自動化への取り組みを行っていきたい。

### 参考文献

- 1) 川口圭史, 吉田乙雄, 巖敬三, 菊田隆, 鉄管走行ロボットのセンサと円周方向走行, 日本ロボット学会誌, Vol.15 No.8, pp.1164~1171, 1997
- 2) 株式会社イクシス HP, <https://www.ixs.co.jp/product/158>
- 3) 永田尚人, 小柳栄次, 西岡義弘: 永久磁石車輪式走行ロボットによる橋梁点検システムの開発, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント) Vol.74, No.2. pp. I\_1~I\_9, 2018.9
- 4) 首都高技術株式会社 HP, やもりん®~磁石式鋼橋点検装置~<https://www.shutoko-eng.jp/technology/magnet.php>
- 5) 小山広光ら, 自己充填コンクリートを用いた覆工の自動化に関する研究 (その2) 壁状型枠を用いた圧入実験, 佐藤工業技術研究所報 No46 pp.34-40, 2021