

建設現場におけるマニピュレータ型耐火被覆吹付ロボットの開発

鹿島建設株式会社

○ 高木 良介
石田 武志
松田 陸

1. はじめに

現在、耐火被覆吹付工事は密閉空間内で行われており、防護服及び防塵マスクを着用した劣悪な環境下での作業である。また、高所作業車を使用した高所での作業が主であり、身体的負担が大きく墜落リスクを伴う工事である。加えて、技能者の技量に頼った感覚的な作業が大半を占めることもあり、技能者不足に伴う技術の伝承が困難になっていることも課題である。そこで、苦渋作業からの解放、安全性の向上、安定した吹付品質の確保を目的として、梁全断面の耐火被覆材を自動で吹付け可能な「耐火被覆吹付ロボット」を開発した。

本稿では、劣悪な環境下での作業を代替する、梁全断面の耐火被覆材を自動で吹付け可能な耐火被覆吹付ロボットのシステム概要と機能、及び現場での現場試行結果について報告する。

2. ロボットシステム概要

本ロボットシステムは、当社で施工実績の多い延床面積 1 万m²以上の中～大規模の事務所ビルを対象としている。フロア内の施工範囲は、ロボットが入ることのできない狭隘なコア部及び外周周り、タワークレーンや工事用エレベータの開口周りを除く専有部の執務エリアとしている（図-1）。ここで、ロボットの繰返しの施工単位として、4 本の柱と大梁に囲まれたエリアをグリッド（図-2）と定義し、そのグリッドに含まれる大梁・小梁の全断面に対して、耐火被覆材を連続して吹付けを行う¹⁾。本章では、開発したロボットのコンセプト、仕様、機能、施工フローについて報告する。

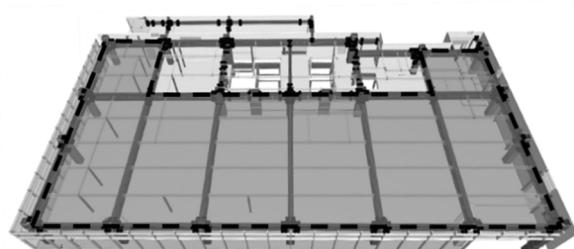


図-1 施工範囲 (塗りつぶし部)

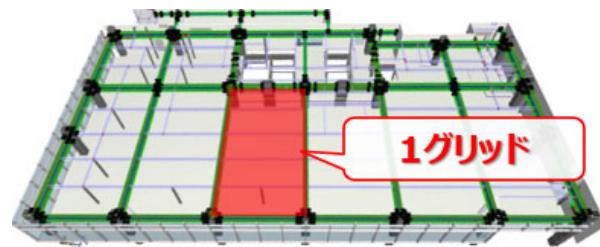


図-2 施工単位 (1 グリッド)

2.1 ロボットのコンセプト

2020 年に当社が開発した耐火被覆吹付ロボット²⁾を写真-1 に示す。高所作業車の荷台に汎用 7 軸マニピュレータとスライドレールを搭載している。スライドレール上をアームが左右に動きながら吹付を行うことで、技能者による作業と同等品質での施工が可能となった。しかし、現場での取り回しが悪く、事前準備に専門知識が必要なため、扱いが難しかった。そこで、本ロボットは普及展開を見据え、小型・軽量化及び事前準備作業の削減を可能とし、誰でも扱えることをコンセプトとして機能開発を行った。



写真-1 耐火被覆吹付ロボット(2020 年)

2.2 ロボット仕様

ロボット外観を写真-2 に示す。小型・軽量化のため、昇降装置にはシザース型ではなく水圧式昇降ポールを採用し、重量増加を招くスライドレールは使用しなかった。施工可能高さは標準オフィスの基準階の階高（4.0～4.5m）をカバーする 4.8m とした。複雑な吹付動作を実現するため、協働型 6

軸ロボットアーム先端に吹付ノズルを装着している。自己位置推定用の 2D-LiDAR を車体下部に、位置補正用のデプスカメラを上部に搭載し、跳ね返りによる汚損防止のためカメラには自動開閉カバーを設けた。走行には履帯ではなく全方向移動可能なメカナムホイールを採用し、細かな位置調整を実現した。外形寸法と質量は表-1 に示すとおり、工事用エレベータで搬送可能な仕様とし、現場での取り回し性を確保している。

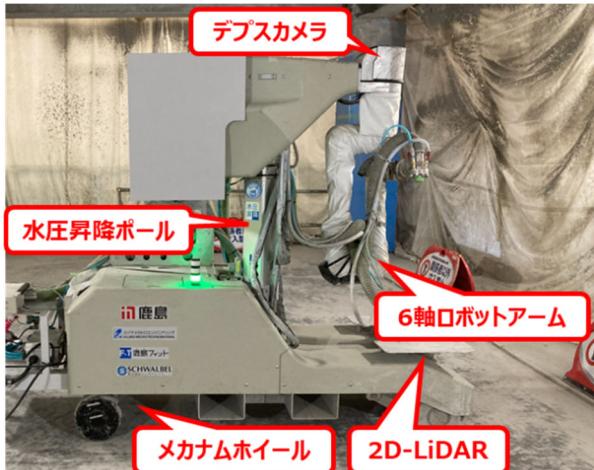


写真-2 ロボット外観

表-1 ロボット仕様

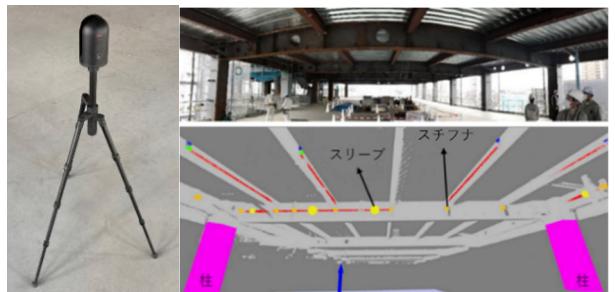
本体サイズ	W:2,830×D:850×H:1,700(mm)
本体質量	900kg
対応高さ	4.8m
走行部	4 輪メカナムホイール
センサ	LiDAR・デプスカメラ×2
アーム	協働 6 軸ロボットアーム
昇降装置	水圧式昇降ポール

2.3 点群を用いた施工対象形状の認識

ロボットによる吹付には、施工対象梁の位置・姿勢・寸法などの幾何情報が必要であり、従来は 3D 設計データ (BIM) から寸法情報を抽出していた。しかし、BIM には不要な情報が多く、抽出作業に時間を要するうえ、専門知識を持つ技能者に依存するため、普及の妨げとなっていた。本システムでは、施工開始時に図-3 に示す 3D スキャナーで対象グリッドをスキャンし、得られた点群から、床・柱・梁・設備スリープ等を認識し、位置・姿勢を含む形状情報を自動算出する機能を開発した¹⁾。スキャンには小型で携帯性に優れた Leica 社 BLK360 G1 を使用し、ボタン操作のみで施工対象の幾何情報を取得可能である。

その場で取得した点群データから梁形状を自動

で計算するため、BIM データからの抽出と比較して、事前準備作業を削減することが可能となった。



2.4 アーム軌道計算機能

従来のロボットは、アームの角度を固定し、スライドレールで横行させて吹付を行っていた。しかし、スライドレールは重量が大きく、車体上部も大型化する課題があった。そこで、小型化と吹付範囲の維持を両立するため、アームの可動域を最大限に活用し、横行レール不要で広範囲の吹付を可能とするアーム軌道計算機能を開発した。

2.4.1 格子点モデルの作成

アームの軌道計算には、ノズルの位置・方向を示す姿勢情報と、移動順序を決める経路情報が必要である。これらを計算するため、梁形状に沿って姿勢情報を格納した格子点モデルを作成し、これに基づく吹付経路計算手法を考案した³⁾ (図-4)。

各格子点には吹付姿勢を定義し、対象ごとの属性情報も付与できる。例えば、吹付面のない配管スリープ円内の格子点には“吹付対象外”といった情報を設定することで、後述する経路計算時に自動で回避することが可能となる。

2.4.2 吹付経路の計算

吹付経路の計算には、深さ優先探索 (DFS: Depth-First Search) アルゴリズム⁴⁾を適用した。DFS は、設定した優先順位に基づき、始点から可能な限り深く探索し、行き止まりに達すると分岐点に戻って探索を続ける手法である。図-5 に設定した探索方向の優先順位を示す。例えば貫通孔周辺の探索では、吹付開始位置から優先度の高い方向に進み、行き止まりに達した場合は直前の分岐点に戻って探索を続けることで経路を決定する (図-6)。

本手法により、吹付対象の格子点を順次移動し、塗り残しを防ぎつつ効率的な経路を構築できる。特に、貫通孔周辺など複雑な形状においても、優先順位に従った探索により連続的な経路が得られる。

また、格子点モデルにはノズル位置とアーム姿勢情報が格納されているため、探索結果を時系列順に並べるだけで吹付動作を生成できる。この仕組みにより、アームの可動域を最大まで活用しつつ広範囲かつ柔軟な自動経路生成が可能となった。

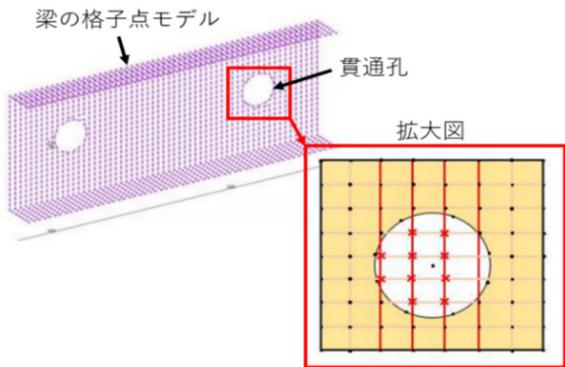


図-4 格子点モデル

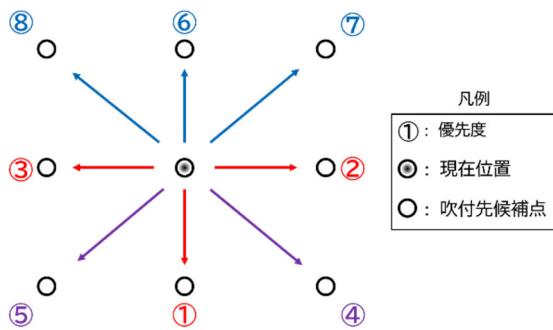


図-5 探索の優先順位

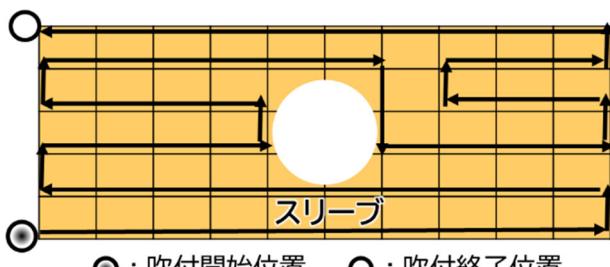


図-6 貫通孔周辺の吹付経路イメージ

2.5 モーション・シミュレータの適用

従来、吹付経路生成アルゴリズムの評価や吹付姿勢などの動作パラメータ調整は、ロボット実機を用いて実施していた。しかし、実機による検証は開発サイクルが長期化し、実験補助などの人的コストも増大する。また、予期せぬ動作による鉄骨との干渉でアームが破損する、あるいは転倒による人的災害のリスクも存在する。そこで、図-7に示す干渉チェック機能に加え、吹付状況を可視化する機能を備えたモーション・シミュレータを開発した。本シミュレータは、図-1の施工対象の幾何情報と図-6の吹付動作情報を取り込み、図-7のようにソフトウェア上で現場環境を再現できる。これにより、車体移動を含む吹付動作全体の確認が可能となる。また、吹付ノズルから噴射される仮想吹付材料と梁との干渉点を紫色の円錐で表示し、吹付方向と位置を視覚的に確認できる。

このシミュレータの活用により、開発・検証サイクルの効率化と安全性の向上を実現した。

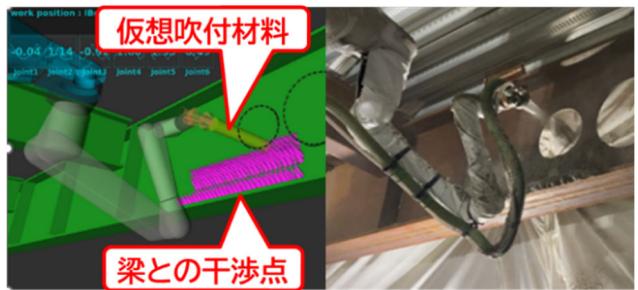


図-7 モーション・シミュレータと実際の吹付

2.6 自己位置推定

車体の盛替え作業による施工速度低下を防ぐため、本ロボットでは2D-LiDARを用いた自己位置推定と自律走行を行う機能を開発した⁵⁾。参照するマップは、施工対象形状の認識時に取得した点群データからマップを自動的に作成することで、吹付直前の現場の状況を反映している(図-8)。このマップと2D-LiDARで取得した点群をマッチングさせることで自身の位置を推定する。これにより、日々マップが変わる建設現場の環境でも、安定して自己位置を推定することが可能となる。

ここで、2D-LiDARによる自己位置推定には±50mm程度の誤差が生じる。そこで、施工直前に車体上部に搭載したデプスカメラで梁のウェブ面を検出し、車体位置を補正する機能を開発した(図-9)。デプスカメラを車体の前と左の2箇所に取付けることで、前後左右の位置補正を±10mm以内の精度で行うことが可能となった。

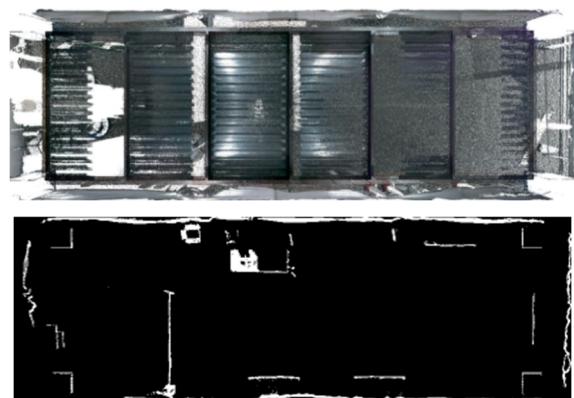


図-8 取得した点群(上)と作成したマップ(下)

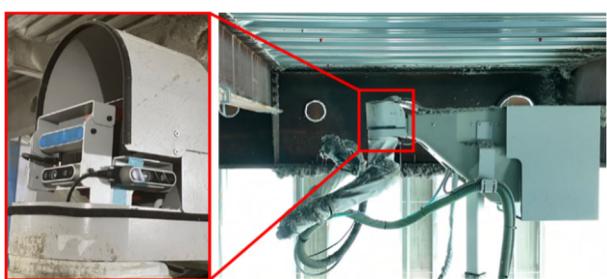


図-9 開閉カバーとデプスカメラ

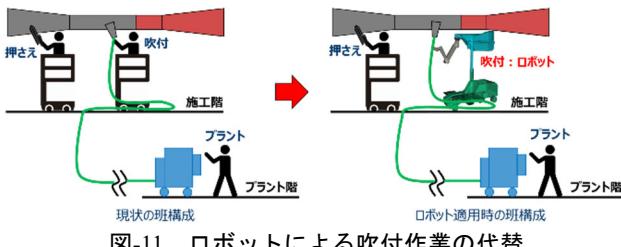
2.7 施工フロー

本ロボットの施工フローを図-10に示す。まず、メカナムホイールにより吹付開始位置まで自律移動し、昇降装置でロボットアームを含む上部フレームを吹付予定高さまで上昇させる。次に、デプスカメラによる位置補正及び材料吐出などの準備が整った後、ロボットアームでノズル先端位置を制御しながら耐火被覆材を自動吹付する。なお、材料の吐出と停止といったプラント制御も、ロボットからの指令により自動で行う。

ロボットの搬入・搬出を除き3Dスキャンから吹付完了までのオペレータによる作業指示は専用のタブレットPCで行う。吹付開始から完了までの一連の動作は、車体移動も含め全自動で実行可能である。これにより、従来は吹付技能者とコテ押さえ技能者の2名で行っていた作業を、図-11に示すようにコテ押さえ技能者がロボット操作を兼務することで省人化できる。



図-10 ロボットによる施工フロー



3. 現場試行計画

本ロボットシステムを当社施工現場にて試行した。本章では適用工事の概要、施工対象及び施工実績の取得方法について説明する。

3.1 適用工事の概要

本ロボットを延床面積25,810.6m²の事務所ビルにて試行した。詳細な工事概要を表-2に示す。地上13階のうち基準階は2~13階で、本ロボットは図-12に示す基準階平面図4~5階の計2フロアの一部に適用した。敷地条件による後施工範囲や、タワークレーンや工事用エレベーターの開口周りはロボットの施工範囲外とした。

表-2 工事概要

工事名	オフィスビル
工期	2023/12/1~2025/10/15(22.5ヶ月)
工事場所	愛知県名古屋市
建築面積	1,845.5 m ²
延床面積	25,810.6 m ²
構造	S造、地下SRC造
階数	地上13階・PH1階・地下1階
最高高さ	59.9m

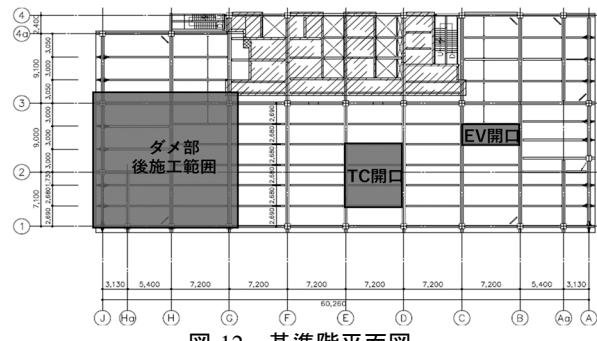


図-12 基準階平面図

3.2 施工対象

施工対象梁を図-13及び図-14に示す。対象は大梁・小梁であり、小梁スパンは2,680~3,000mmとした。施工範囲はロボットの施工能力、工事のタクト工程、技能工の施工範囲を考慮して決定した。

ロボット施工階の耐火時間は全て2時間耐火（吹付厚さ45mm）である。ロボットの吹付面積は、対象梁の表面積に基づき算出した。図-15に吹付パターン別の対象部を示す。図-15(a)は梁全断面を吹付する場合、図-15(b)はロボットが一部施工できない外周部を対象とする場合である。対象面積の合計は523m²となる。



図-13 4F 施工範囲 (黒塗り部)

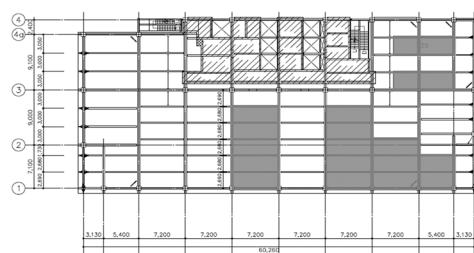


図-14 5F 施工範囲 (黒塗り部)

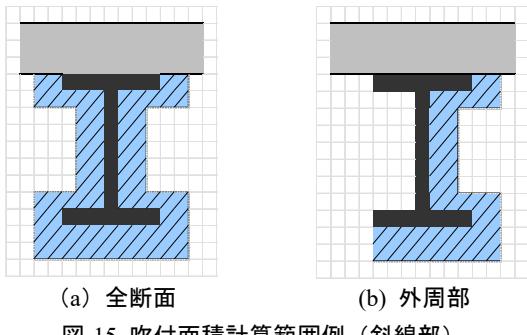


図-15 吹付面積計算範囲例（斜線部）

4. 現場試行結果

4.1 車体動作の評価

現場環境において、ロボット搬入から吹付までの一連の動作を確認した。自己位置推定と事前シミュレーションによる動作確認により、写真-3に示すように手先と梁の距離は一定に保たれ、吹付中にアームと梁が接触することではなく、安全性の向上を確認した。一方、吹付中に工事用エレベータが昇降すると、エレベータのゲージと昇降路の間に風が発生し、写真-4に示す開口を覆う養生材（ブルーシート等）が揺れる。その結果、2D-LiDARで取得した点群がマップと合わなくななり、一時的に自己位置を見失う事象が発生した。エレベータの通過後は自己位置が復帰するが、通過中は車体移動を停止する必要があった。自己位置を喪失した状態での移動は危険であるため、周囲環境の変化に対してより堅牢な自己位置推定アルゴリズムの開発が必要であると分かった。



写真-3 ジョイント部吹付の様子



写真-4 エレベータ開口周り等の養生

4.2 評価方法

従来の耐火ピンによる測定はピンポイントでの評価に限られ、被覆全体の品質把握が困難であった。そこで、物体検出時に使用した3Dスキャナーを用い、吹付後に点群データを取得し、吹付前の点群との差分解析により吹付厚さを定量評価した。ロボット施工歩掛については、作業内容ごとにシステム内でログを自動収集し、解析を行った。ログは移動時間、吹付時間、待機時間を記録し、後日実際の施工面積を基に吹付速度を算出した。

4.2.1 吹付厚さ及び比重

吹付前後の点群差分解析結果の例を図-16に示す。被覆厚が薄い部分は青系、厚い部分は赤系で表示される。図-16より、ウェブ面及び下フランジの大部分が2時間耐火基準の45mm以上であることを確認した。また、本システムのアーム軌道計算機能により、梁交差部（ジョイント）やスリーブ周辺も吹付可能なことを確認した。しかし、下フランジ小口やスリーブ周辺、ジョイント付近では一部45mm未満の領域が生じ、人による補修を要した。

この原因は、複雑な動作時にアームの加減速により吹付速度が部位ごとに変化したためと考えられる。補修時間の増加は施工効率を低下させるため、より均一な吹付を実現するモーション改良が必要である。

また、ロボットが一度に吹付可能なスパンは約1mであり、図-16の範囲は3スパンに分けて吹付を行った。スパンの継ぎ目も凹凸が発生しやすく、一部は目標の45mmを大きく上回る90mm程度の厚みとなっていた。基準値は満たしているが、極端に厚みがあると次工程の作業の支障となるため、折返し部分のモーション改良が必要と分かった。なお、比重は0.30~0.50の間となっており、基準の0.28以上を満たしていた。

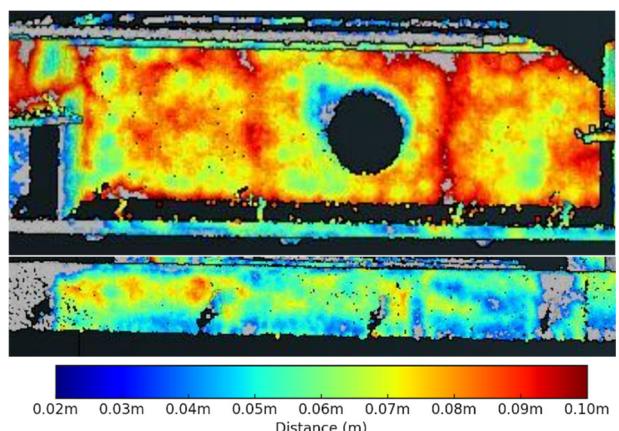


図-16 吹付厚さの可視化

4.2.2 施工歩掛

ロボットのログや施工実績から算出した、日々の単位時間当たりの吹付速度と吹付面積の推移を

図-17に示す。技能者の施工範囲との調整で、日によって施工本数に制限があったため、ロボットの吹付面積は日によって変動が大きい。反対に、吹付面積と稼働時間から計算した吹付速度から、吹付面積に関わらずほぼ一定速度で施工可能なことが分かった。

施工速度は最大で約 $20\text{m}^2/\text{h}$ 、施工期間の平均では約 $15.6\text{ m}^2/\text{h}$ となった。また、一日の最大施工面積は、ロボットが5時間稼働した日において約 70 m^2 であった。ここで、一般的な技能者の1日の施工面積を $130\text{ m}^2/\text{日}$ (5時間吹付)とすると、技能工に対しロボットは約53%の施工能力をとなることが分かった。

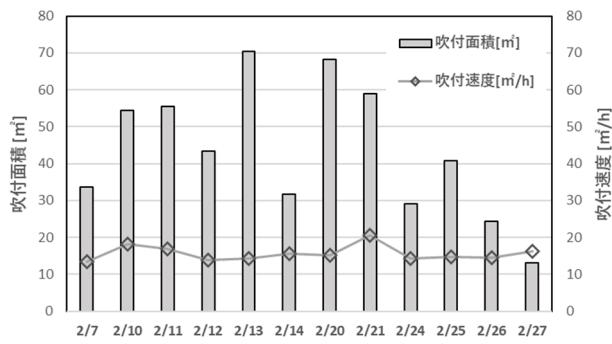


図-17 単位時間当たりの吹付速度

施工速度が伸び悩んだ原因としては、稼働時間に対し車体の移動時間の占める割合が高いことが原因と考えられる。図-18に稼働時間における移動時間(車体移動、ポール上昇)と吹付時間(材料吐出開始～吐出終了の時間)の割合を示す。表から、ロボット動作時間の内、約50%が車体移動に費やされていることが分かる。これは、ロボットアームが一度に吹付可能な範囲が1mと短く、頻繁に車体位置移動を行う必要があるためである。また、移動時は安全のためポールを下げてから移動するため、ポールの上下移動にも時間がかかる。したがって、施工歩掛改善には移動やポール速度の高速化や吹付可能範囲の拡大による、車体移動時間の削減が必要だと分かった。

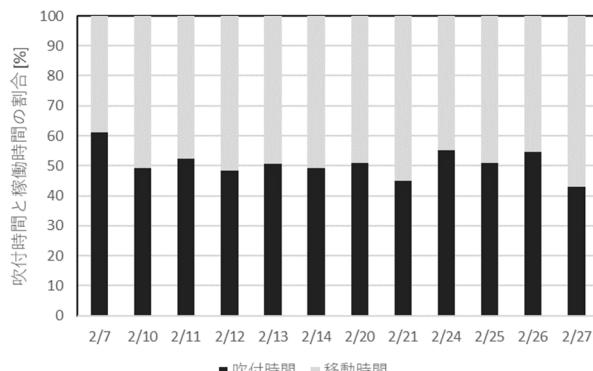


図-18 ロボット稼働時間に対する
吹付時間と移動時間の割合

5.まとめ

物体検出機能、モーション生成機能、マップ作成及び自己位置推定機能による、環境変化の大きな現場環境にも柔軟に対応可能なロボットシステムを開発した。そして、施工計画を元に現場試適用に取り組んだ。本システムを用いて梁全断面の連続吹付を行い、吹付作業をロボットで代替可能なことを確認した。また、点群を用いた吹付厚さの可視化や、歩掛計測による施工能力の評価も行った。

今後は、より周囲の環境変化に対して頑健な自己位置推定アルゴリズムの開発や、均一な出来形を実現するためのモーション改良に取り組み、動作の安定化と施工品質の向上に取り組む。また、施工歩掛向上に向け、車体移動速度の向上や吹付範囲の拡大に取り組む予定である。

引き続き、システムの改良と現場適用を進めて生産性向上を図り、苦渋作業からの解放、安全性の向上、安定した施工品質の確保に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 松田陸・吉田武史・清水宏太・石田武志：耐火被覆吹付工事のロボット化に関する研究 その1：耐火被覆自動吹付のためのロボットシステム、日本建築学会2025年度大会（九州），pp.1405～1406，2025年
- 2) 鹿島建設株式会社：建築の生産プロセスを変革する「鹿島スマート生産ビジョン」を策定，
<https://www.kajima.co.jp/news/press/201811/12a1-j.htm>, 2018年.
- 3) 吉田武史・松田陸・清水宏太・石田武志：耐火被覆吹付工事のロボット化に関する研究 その2：耐火被覆吹付動作の自動生成機能の開発、日本建築学会2025年度大会（九州），pp.1407～1408，2025年
- 4) 篠塙功・胡振江・武市正人：グラフの探索関数の再帰的定義と変換、コンピュータソフトウェア, Vol.17 , No.3, pp.2-19, 2000年
- 5) 松田陸・清水宏太・吉田武史・石田武志：耐火被覆吹付工事のロボット化に関する研究 その3：自律走行のための自己位置推定機能の開発、日本建築学会2025年度大会（九州），pp. 1409～1410，2025年