

耐火被覆吹付けロボット2号機の開発と超高層ビル工事への適用

瀬川 紘 史 池田 雄 一
坂上 肇 上田 航 平

Development of the Second Fireproof Coating Spraying Robot and Application to Super-High-Rise Building Construction

Hirofumi Segawa Yuichi Ikeda
Hajime Sakagami Kohei Ueda

Abstract

A labor-saving solution is in great demand in fireproofing work owing to a significant labor shortage. The authors applied a newly developed second-generation (Gen2) fireproof coating spraying robot for super high-rise complex building construction, and the following outcomes were obtained: (1) One robot operator could operate two Gen2 robots simultaneously. (2) Using two Gen2 robots, they achieved a rate that was more than twice that of a skilled worker. (3) The stopping accuracy of the Gen2 robots during autonomous movement was within 10 mm set as the target value. In the next stage, we plan to continue working to improve the automated construction technology and further advance its application in building construction.

概 要

建設工事の中でも耐火被覆工事は、作業環境の過酷さから技能工不足が顕著であり、耐火被覆工の省人化が可能な技術開発が求められている。筆者らは新たに開発した耐火被覆吹付けロボット2号機を超高層ビルの建築現場に適用し、以下の結果を得た。(1)新たに開発したロボット2号機2台の運用が、ロボットオペレーター1名で可能であることを確認した。(2)ロボット2台体制で施工することで、技能工の2倍を上回る生産性を達成することができた。(3)ロボットの自律移動の停止精度は、目標とした10mm以内に収まった。今後は、自動施工の高度化に向けた取組みを経て、建築工事への適用をさらに進めて行く方針である。

1. はじめに

近年、耐火被覆工事では、特に夏場の作業環境の過酷さから技能工不足が顕著であり、作業の省人化が可能な技術開発が求められている。大林組では、半乾式吹付けロックウール耐火被覆(以下、耐火被覆)の吹付け作業の自動化を目指し、梁の吹付けを主な対象とした耐火被覆吹付けロボット(以下、ロボット)を開発し、中低層建物の現場適用の回数を重ねながら、技能工との施工体制の在り方を模索してきた。本報では、プロトタイプ機(以下、1号機)を複数の現場に適用し、そこで得られた課題を反映した2号機を開発した後、超高層ビルの工事に適用した概要、計画および結果について報告する。

2. 1号機の工事適用と課題

2.1 1号機の施工実績

1号機(Photo 1)は計4工事に適用した。その施工実績をTable 1に示す。適用した建物は低層、中高層、高層の研究施設や複合ビルであり、ロボットで施工した耐火被覆仕様は、1時間耐火・2時間耐火・3時間耐火のすべてである。4工事における吹付け総面積は9,150㎡となった。比重および吹付け厚さは大臣認定工法の規定値を満足し、



Photo 1 ロボット1号機
The First Generation (Gen1) Robot

Table 1 ロボット1号機の施工実績
Construction Results of Gen1 Robot

	工事1	工事2
建物用途	研究施設	複合ビル
階数	地上4階、塔屋1階	地下1階、地上14階、塔屋1階
施工対象階	1階の一部	4～11階の一部
耐火被覆仕様	1時間耐火(規定厚さ25mm)	2時間耐火(規定厚さ45mm) 1時間耐火(規定厚さ25mm)
実施時期	2019年11月	2021年3～5月
吹付け面積	450 ㎡	1,200 ㎡
	工事3	工事4
建物用途	複合ビル	複合ビル
階数	地下1階、地上12階、塔屋1階	地下1階、地上30階、塔屋1階
施工対象階	3～7階の一部	4～23階の一部
耐火被覆仕様	2時間耐火(規定厚さ45mm)	3時間耐火(規定厚さ60mm) 2時間耐火(規定厚さ45mm)
実施時期	2021年10～12月	2022年11月～2023年4月
吹付け面積	1,600 ㎡	5,900 ㎡

かつ、技能工と同等の生産性を得たことを確認した。一方、ロボットでは吹付けができない箇所があること等から、技能工による補修吹付けと組み合わせて工事に適用した²⁾。

2.2 1号機の課題

1号機を計4工事に適用した結果、いくつかの課題を得た。工事現場においては定格荷重が2,000kg未満の工事用エレベーターが設置されるケースが一定数以上ある中、1号機では上階へ盛替える際に定格荷重が2,500kg以上の工事用エレベーターが必要であった。加えて、工事用エレベーターへのロボットの乗り降りがスムーズではなく、上階への盛替えに時間を要していた。また、ロボットの移動をロボットオペレーターによるリモコン操作に頼っていたため、ロボットオペレーターの作業負担が大きかった。

得られた課題に対する解決方法は以下の通りである。

- 1) ロボットの小サイズ化・重量の低減
- 2) 上階への盛替え時間の短縮
- 3) ロボットの移動を自動化

1号機の工事適用を通して得られた課題を解決・反映した2号機を開発することとした。

3. 2号機の開発

3.1 2号機の仕様

1号機の工事適用で得られた課題を改善した2号機を開発した。2号機では、適用機会の拡大を視野に入れて定格荷重が2,000kgの工事用エレベーターに積載できるように軽量化した。また、工事用エレベーターへの乗り降り時間を短縮するため、メカナムホイール（車輪の円周上に小型のローラーを複数配置した全方向車輪）を90°回転して配置し、乗り降りしやすくした。開発した2号機をPhoto 2に、同仕様をTable 2に示す。なお、2号機の構成や吹付け対象の条件設定は1号機と同様である。

3.2 自律移動機能の開発

測量で使われる後方交会法により測位する自律移動機能を2号機に追加搭載した。自律移動用の計測ユニットをPhoto 3に、自律移動の一連のフローをFig. 1に、自己位置の計測手法の概念図をFig. 2に示す。計測ユニットのカメラで、既知の座標点の2箇所配置したターゲット（Photo 4）を測距し、得られた距離と角度からロボットの自己位置と方位角を算出する。事前に屋内環境下で実施した検証実験では、最大測位誤差が10 mm未満、標準偏差が5mm未満となったことを確認した。

3.3 ロボットの複数台同時稼働への対応

ロボットを複数台運用することにより、1台の場合より高効率な運用が可能かを検証するため、2号機は同タイプ

のものを2台製作した。具体的に、ロボットオペレーター1名（および相番者）でロボット2台の運用が可能かについての検証と、ロボット1台運用時と2台運用時の生産性の比較を行うこととした。

4. 超高層ビル工事への2号機の適用

4.1 適用目的

適用目的は、開発したロボット2号機を用いた施工の実績データの収集、1号機からの改善点の検証、現場環境下における自律移動の停止精度の確認、複数台運用の効果の検証である。



Photo 2 ロボット2号機
The Second Generation (Gen2) Robot

Table 2 ロボット2号機の仕様
Specifications of Gen2 Robot

構成	走行装置、昇降装置、横行装置 6軸産業用ロボットアーム (計8軸のロボット)
サイズ(WDH)	2,800×1,200×1,330 mm
重量	1,850 kg
対応可能階高	5,500 mm以下
対応可能な梁せい	1,500 mm以下
最大吹付け幅	3,400 mm

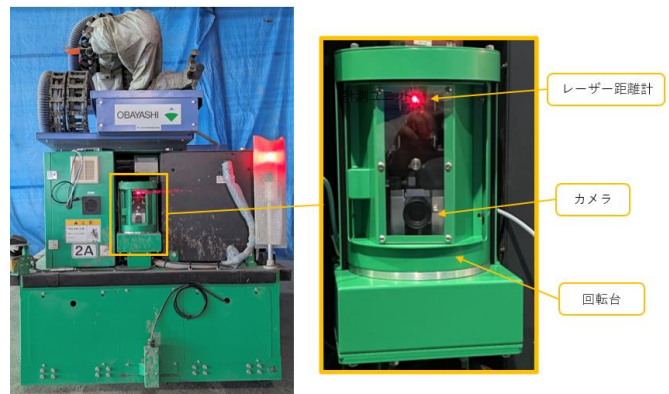


Photo 3 自律移動用の計測ユニット
Measurement Unit for Autonomous Mobility

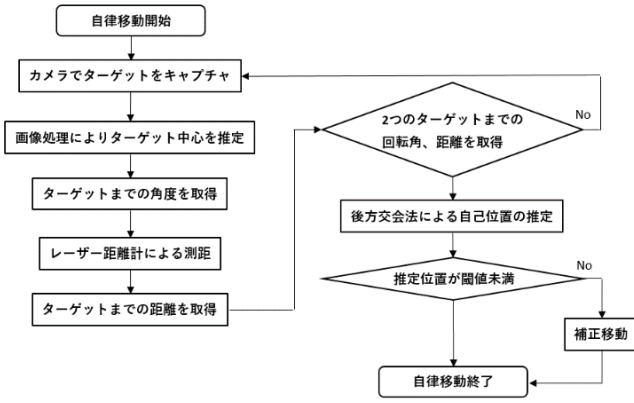


Fig. 1 自律移動のフロー
Autonomous Mobility Flow

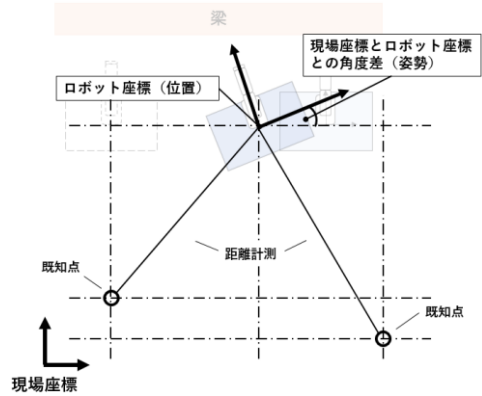


Fig. 2 自己位置の計測手法の概念
Concept of Self-Location Measurement Method



Photo 4 自律移動用のターゲット
Target for Autonomous Mobility

Table 3 適用工事の概要
Outline of Applied Construction

建物階数	地上30階, 地下3階
建物用途	事務所(低層は商業施設等)
ロボット施工エリアの床面積	約1,000m ²
ロボット施工対象階	9~26階
ロボット施工対象階の耐火時間	2時間 (17~26階) 3時間 (9~16階)

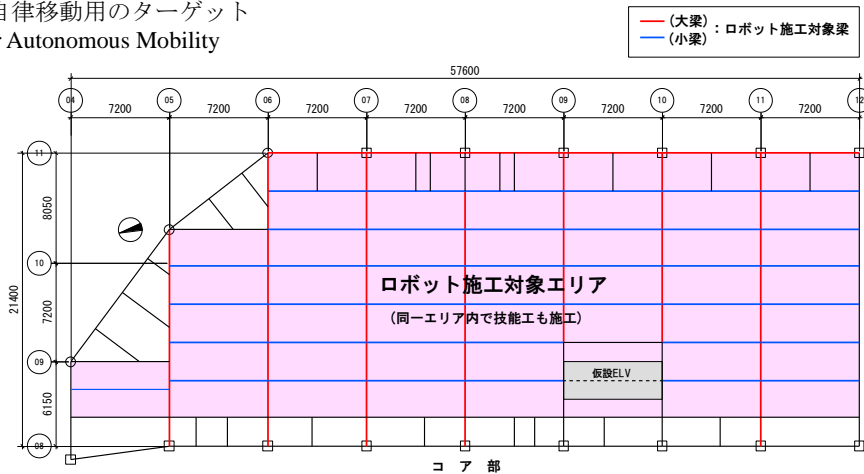


Fig. 3 ロボット施工の対象エリア
Target Area for Robot Construction

4.2 適用工事の概要

適用工事の概要をTable 3に示す。対象の建物は地下3階、地上30階建ての超高層ビルである。低層階は商業施設等になっており、事務所部分の基準階は9~27階である。本建物の耐火時間と被覆厚さについては、16階までが60mm (3時間耐火)、17~26階が45mm (2時間耐火)、27階以上が25mm (1時間耐火) である。

4.3 適用計画

4.3.1 ロボットの施工対象 ロボットの適用階は、9階から26階 (2時間耐火の最上階) とした。技能工の作業

が特にひっ迫する3時間耐火の9~16階を2台体制で、2時間耐火の17~26階を1台体制で施工する計画とした。各階におけるロボット施工の対象エリアをFig. 3に示す。基準階のうち、事務所エリアの1/4にあたる約1,000m²をロボットの適用範囲とした。ロボットの施工数量は、仕上げ工事のタクト工程の日数と技能工の施工数量とのバランスを見て決定した。

4.3.2 施工体制 当該工事においては、同一エリア内で技能工とロボットが同時並行で施工する協業体制とした。建物外周周り、コア部などの梁は技能工が分担した。協業体制下におけるロボットの施工体制をFig. 4に、

施工状況をPhoto 5に示す。施工エリアは、すべて天井内チャンパーとなっており、仕上げにセメントスラリーの吹付けが必要であった。外周部梁の外周側や梁端部等、ロボットでは吹付けできない箇所があるため、事前に技能工との作業分担を検討した。全体の生産性を考慮した結果、まず、ロボットで吹付けを行い、以降は技能工が補修吹付け・コテ押さえ・厚さ確認を行った上で、最後にセメントスラリーの吹付けを行う作業手順とし、監理者の承認を得た。その施工フローをFig. 5に示す。1号機では、ロボット1台に対してロボットオペレーター1名で対応した。2号機では、3時間耐火階においては、ロボット2台に対してロボットオペレーター1名で計画した。また、2時間耐火階においては、ロボットが1台になるため、ロボットオペレーター1名で計画した。各階の施工は仕上げ工程に合わせて行い、施工フロアの切り替え(上階へのロボットの盛替え)は技能工と同じタイミングで実施した。

4.3.3 ロボットの配置計画 吹付け施工時のロボットの配置計画例をFig. 6に示す。施工対象が小梁の場合は、吹付け領域を7.2mスパンの材軸方向に2分割し、梁の裏面の両面の計4箇所にて吹付けた。いずれの梁も、梁芯から平行にオフセットした線上にロボットを配置し、梁の材軸方向に横行装置でロボットアームを移動させて、梁へ被覆を効率良く吹付けた。

4.3.4 施工実績データの収集 作業分析を行うため、作業内容別に時間を記録した。作業時間として、ロボットの移動、吹付け、作業前の準備作業、後片付け、休憩時間や手待ち時間をそれぞれ記録した。

4.4 適用結果

4.4.1 施工品質 (吹付け厚さおよび比重) ロボットで吹付けしなかった箇所を含め、吹付け後に技能工に

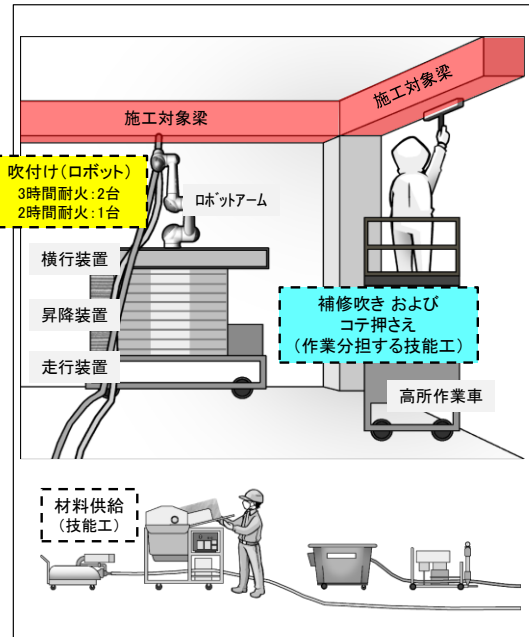


Fig. 4 協業下におけるロボットの施工体制
Spraying by Gen2 Robot under a Collaborative System



Photo 5 ロボット2号機の施工状況
Construction Status of Gen2 Robot

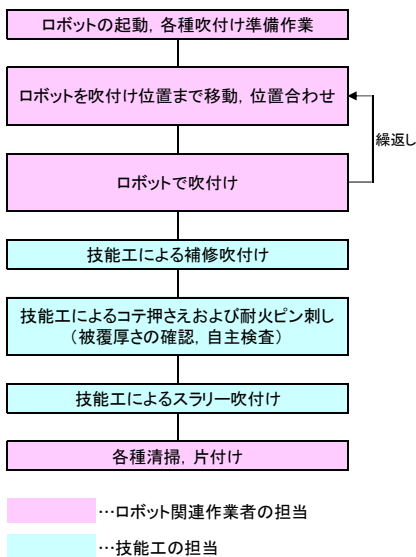


Fig. 5 ロボット施工のフロー
Robot Construction Flow

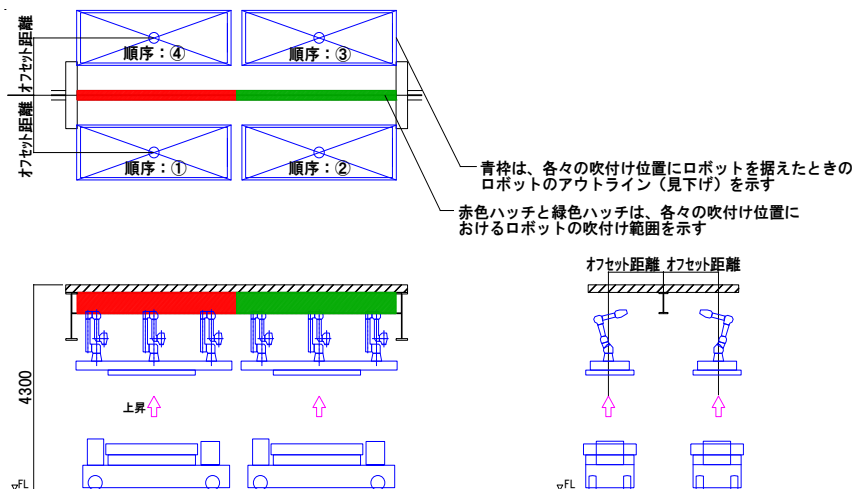


Fig. 6 吹付け施工時のロボットの配置 (小梁の場合)
Arrangement of Robot during Spraying Work

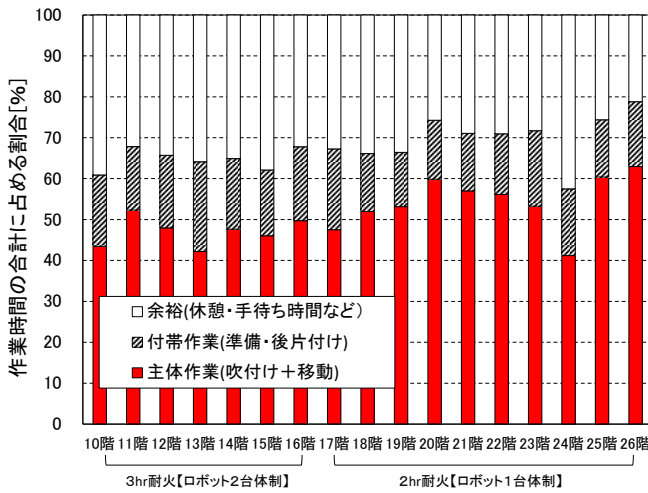


Fig. 7 各作業が合計時間に占める割合の推移
Changes in Percentage of Working Hours

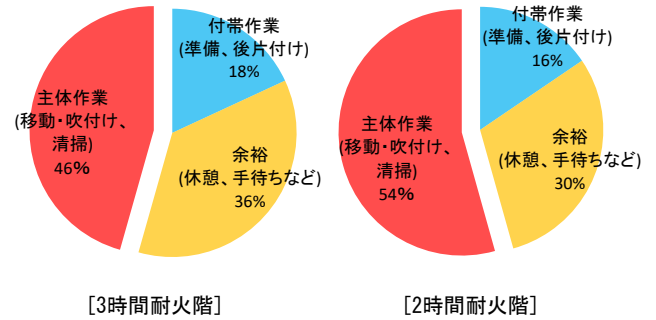


Fig. 8 施工1日あたりの作業時間の割合
(3時間耐火階と2時間耐火階の平均値の比較)
Percentage of Working Hours Per Day
(Comparison of Average Value on 3-Hour
Fire-Resistant Floors and 2-Hour
Fire-Resistant Floors)

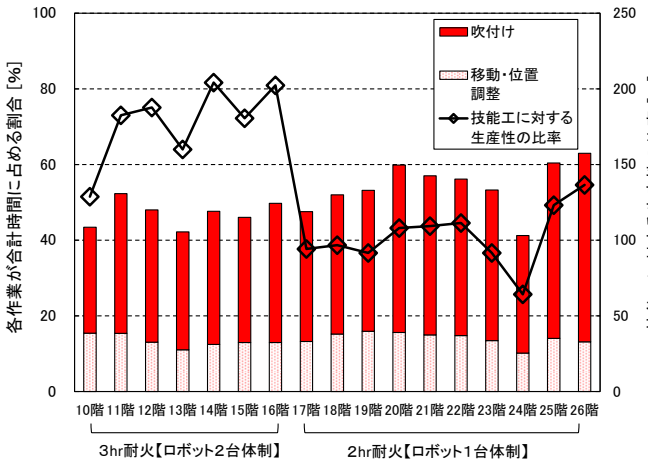


Fig. 9 生産性(平均値)および各作業の割合の推移
Changes in Sprayed Area per Day and Work Ratio

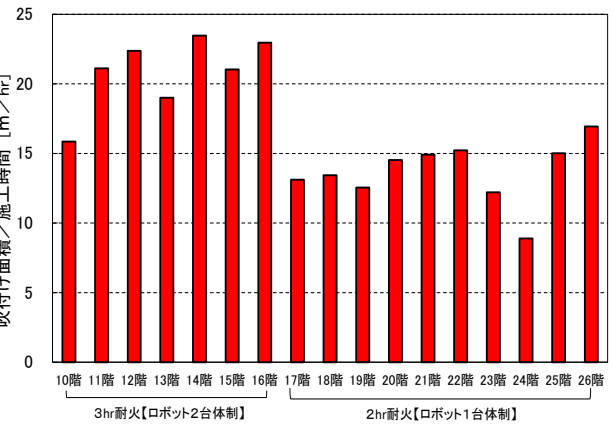


Fig. 10 単位時間あたりの吹付け面積の推移
Changes in Sprayed Area per Unit Time

より補修吹付けを行った。コテ押さえ時に厚さを確認したところ、ロックウール工業会の施工管理基準値を満足した。

吹付けロックウールの比重は、ロックウール工業会の施工管理基準値である0.28以上を目標として施工した。測定結果はいずれも0.29~0.30となり、施工管理基準値を上回った。

4.4.2 自律移動の停止精度 2号機に搭載した自律移動機能による停止精度を確認した。停止精度は、事前に測量工がスラブ上に出したロボット停止位置の墨に対するロボットの実際の停止位置との誤差で評価した。誤差の絶対値の平均は(Ex, Ey)=(2.7, 4.7)mm, 同標準偏差は(σx, σy)=(1.7, 2.2)mmとなった。吹き付けた被覆の品質確保のために目標として設定した最大停止誤差は10mm以内であり、要求精度を十分に満たした³⁾。耐火被覆の粉塵環境下においても、事前の屋内環境下での実験と同等の結果が得られた。一方、現場の光環境によって

ターゲットを見失うことがあり、自律移動を施工全体で運用することができなかった。今後、光環境などによらずターゲット認識のロボスタ性を向上させる必要があることがわかった。

4.4.3 作業時間 作業能率測定指針⁴⁾から、ロボットの全作業時間のうち、ロボットによる吹付けおよび吹付け対象梁の近傍までのロボットの移動は主体作業(清掃も含む)に分類される。それ以外は、ロボット施工の準備作業(ロボット起動・点検・材料吐出量の確認など)および後片付けなどは付帯作業、休憩時間や手待ち時間は余裕、にそれぞれ分類される。分類した各作業時間について1日の作業時間全体に占める割合の推移をFig. 7に示す。また、Fig. 8に施工1日あたりの作業時間の割合(3時間耐火階の平均値と2時間耐火階の平均値)をそれぞれ示す。同図は、朝礼から作業終了までの時間(午前・午後の休憩および昼休憩も含む)を100%としたときの、主体作業、付帯作業、余裕の占める割合をそれぞれ表す。

ロボット2台体制で施工した3時間耐火階（10階～16階）に比べ、ロボット1台体制で施工した2時間耐火階（17階～25階）の方が主体作業の割合が高く、手待ち時間の割合が低かった。これは、2台体制においてロボットオペレーター1名で対応したため、一方のロボットが手待ちになる場面があったことがその理由である。

4.4.4 生産性 各階の生産性（技能工1名による1日あたりの吹付け面積を100%としたときの比率）の推移（右軸、折れ線）と、主体作業の割合の推移（左軸、棒グラフ）をFig. 9に示す。ロボット2台体制で施工した3時間耐火階の生産性（ロボット2台分で吹付けた面積）は、技能工の生産性の1.5～2倍程度となった。オペレーターが1名であってもロボットを2台稼働させることで、技能工の1.5～2倍程度の生産性が得られることが示された。一方、ロボット1台体制で施工した2時間耐火階の生産性は技能工と概ね同等であった。

各階の単位時間あたりの吹付け面積（吹付け面積を施工時間（休憩時間を除いた作業時間）で除したもの）の推移をFig. 10に示す。3時間耐火と2時間耐火で被覆厚さの規定値が異なる条件下であったが、ロボット2台体制の結果は1台体制の結果の約1.5倍となり、台数が倍であっても吹付け面積は2倍にならなかった。これは、2台体制の場合、手待ち時間が1台体制の場合よりも長くなり吹付け面積が減少したことと、1台体制で施工したエリア（2時間耐火階）に比べ、2台体制での施工エリア（3時間耐火階）は吹付け厚さが厚く施工時間を要したことがその理由である。一方、自律移動が常時運用できれば、ロボットは連続で作業し続けることができ、基本的に手待ちは発生しないと推察された。したがって、ロボットオペレーター1名に対してロボットを複数台運用する状況では、自律移動機能は欠かせない機能であることが示された。

5. まとめ

新たに開発した耐火被覆吹付けロボット2号機を超高

層ビル工事へ適用し、施工実績データを収集した。その結果、得られた知見を以下に示す。

- 1) ロボットが耐火被覆工事の環境下で自律移動した際の停止精度は、目標設定した±10mm以内であることを確認した。
- 2) ロボットオペレーター1名でロボット2台の運用が可能であることを確認した。
- 3) ロボット2台体制では、技能工の1.5～2倍程度の生産性を達成した。
- 4) ロボット2台体制では、1台体制よりも手待ち時間が長くなり、施工効率が低くなる傾向であった。このため、ロボットを複数台運用する場合、ロボットが連続して作業し続けられる自律移動機能が必須であることがわかった。
- 5) ロボットでの吹付け後に技能工により補修吹付けした被覆は、厚さおよび比重ともロックウール工業会の施工管理基準値を満足した。

今後もロボットの現場適用を継続し、生産性や品質のさらなる向上に向けた取り組みを行う方針である。

参考文献

- 1) 瀬川紘史，他：耐火被覆吹付けロボットの中高層事務所ビル工事への適用，大林組技術研究所報，No. 86，2022.12
- 2) 池田雄一，他：点群データを用いた耐火被覆工事のロボット化における目標厚さの設定，日本建築学会構造系論文集，Vol.88，No.809，pp.1072-1081，2023.7
- 3) 上田航平，他：耐火被覆吹付けロボットの開発と現場適用，日本建築学会第24回建築の自動化技術シンポジウム予稿集，Vol.88，No.809，pp.47-50，2024.3
- 4) 日本建築学会：作業能率測定指針，丸善，1990.2