

## 耐火被覆吹付ロボットの開発

野村 勇樹 南川 達浩 中村 知行

Yuki Nomura, Tatsuhiro Minamikawa, Tomoyuki Nakamura

### 概 要

建設工事の現場では、建設技能者の高齢化や人手不足が深刻な問題となっている。その背景には少子高齢化や建設需要の増加に加え、身体への負担が大きい作業や、高度な知識や技術・経験を要する作業での人員確保の困難さが挙げられる。筆者らは人手不足の実態を把握するため、社内の現場管理者を対象に「建設技能者の手配が困難な職種」についてのアンケート調査を実施した。その結果、各種工程の中で、耐火被覆吹付工事で特に人員不足が深刻であるという状況が明らかになった。耐火被覆吹付工事は浮遊粉塵等の影響により、作業者にとって非常に身体的負担の大きな作業である。本研究では建設業における人手不足対策の一つとして、耐火被覆吹付作業を代替する耐火被覆吹付ロボット（以下、「吹付ロボット」と呼ぶ）を開発した。吹付ロボットは移動機構・昇降機構・多関節アーム・各種センサから構成され、BIM データから抽出した建物情報に沿って吹付作業を実施する。吹付ロボットは作業者と吹付箇所を分担することで労働生産性を向上させ、工期を約3割削減することができる。本報ではロボットの構成要素についての概要と、実際に現場実証を実施した内容を記す。

### Development of Fireproof Coating Sprayer Robot

#### Abstract

In construction work, aging and labor shortages of workers have become serious issues. This situation is attributed to factors such as the declining birthrate and aging population, the increase in construction demand, the physically demanding nature of the work, and the difficulty in securing personnel for tasks that require advanced knowledge, skills, and experience. To grasp the actual situation of labor shortages, we conducted a survey targeting on-site managers within our company regarding "occupations for which it is difficult to arrange skilled construction workers." The results revealed that among various processes, the shortage of personnel for fireproof coating spray work is particularly severe. Fireproof coating spray work is very burdensome for workers due to the effects of airborne dust and other factors. As one countermeasure to address the labor shortage in the construction industry, this study developed a fireproof coating sprayer robot ("sprayer robot") to replace human labor in fireproof coating spray work. The sprayer robot consists of a mobility mechanism, a lifting mechanism, a multi-joint arm, and various sensors. It performs spray work according to building information extracted from BIM data. By dividing the spray areas with human workers, the sprayer robot can improve labor productivity and reduce the construction period by approximately 30%. This paper provides an overview of the components of the robot and describes the content of the actual field demonstration.

キーワード：人手不足，ロボット，耐火被覆，ロックウール，  
吹き付け半乾式工法

## 1. はじめに

建設業界では、かねてより技能者の人手不足や高齢化が大きな問題として存在し、将来さらに深刻化すると予想されている。その背景には3K（きつい・汚い・危険）のイメージや長時間労働、休日の少なさなどがあるとされている。建設業界が今後も事業を継続していくためには、これらの課題を解決していく必要がある。

我々はまず最優先で改善すべき職種を絞り込むために、社内の現場管理者を対象に「建設技能者の手配が困難な職種」についてのアンケート調査を実施した。その結果、耐火被覆吹付工事で特に人員不足が深刻であるという状況が明らかになった。耐火被覆吹付工事は作業環境が劣悪と言われており、一般的な人手不足要因とも合致する。耐火被覆吹付工事は作業環境に関して以前より問題になっており、1980年代には工事を代替するロボットの開発も行われていた。ただし、設置や操作の問題などで実用化には至らなかった。そこで弊社でも吹付ロボットの開発に着手し、2018年に実現場での試行を行った<sup>2)</sup>。さらに現場試行の結果を踏まえ、その改良も実施した。本報では、改良後の吹付ロボットとその検証結果について概説する。

## 2. ロボットによる耐火被覆吹付工事

### 2.1 耐火被覆吹付工事の概要

耐火被覆とは、火災が生じた際に、鉄骨造の骨組みを一定時間熱から守るために耐火性・断熱性の高い材料で柱・梁などを被覆することである。耐火被覆吹付工事では、耐火材であるロックウールとセメントスラリーを圧送装置によって送り出し、ホースを経由して吐出された混合材料を鉄骨材に付着させる。しかし吐出時にはロックウールファイバーの浮遊粉塵が発生し、吹付作業者が粉塵を吸引したり、皮膚に付着させると喉や皮膚に痛み・かゆみが生じる。それを防ぐために気温の高い日であっても防塵マスク、ナイロン製の衣服を作業着に重ねて着用する必要があり、非常に身体的負担の大きい作業である（写真1）。

### 2.2 作業人員の構成とロボットの運用方法

耐火被覆吹付工事の作業人員は、一般的に3人体制で構成される。被覆材の吹付作業に1名、付着させた被覆材を押さえ付ける仕上げと自主検査、落下した被覆材の清掃作業に1名、圧送装置の操

作と被覆材の材料供給に1名、の構成となる。この中でも被覆材の吹付作業が最も作業環境が悪く、熟練の技能も必要となると言われている。人手不足による技能の習熟・継承が困難になる中で、作業負荷の高い吹付作業の改善が非常に重要となる。

そこで我々は被覆材の吹付作業を代替する吹付ロボットの開発に着手した。吹付ロボットの運用方法としては、図1のように従来の3人体制に吹付ロボット1台と圧送装置1セットを追加する運用を想定する。この運用方法では、安全性確保のため吹付ロボットは作業者と離れたエリアで吹付を行い、吹付ロボットの施工対象外箇所や補修を吹付作業者が担う協働体制をとる。また、圧送装置及びホースは従来から使用されているものをそのまま流用できる仕様とし、吹付ロボット非稼働時にはホースを取り外すことで吹付作業者が施工できるようにする。そのため、吹付ロボットが使用できる現場とできない現場で人員調整を行う必要が生じず、無理なく導入が進められる。

吹付ロボットの主な施工対象物件は、物流倉庫などの大型施設とした。一般的に大型施設は一物件内での吹付面積が大きく、吹付ロボットの搬出入時間に対する吹付作業時間の比率を多くとることができるため、効率的な作業を実現できる。



写真1 耐火被覆吹付作業

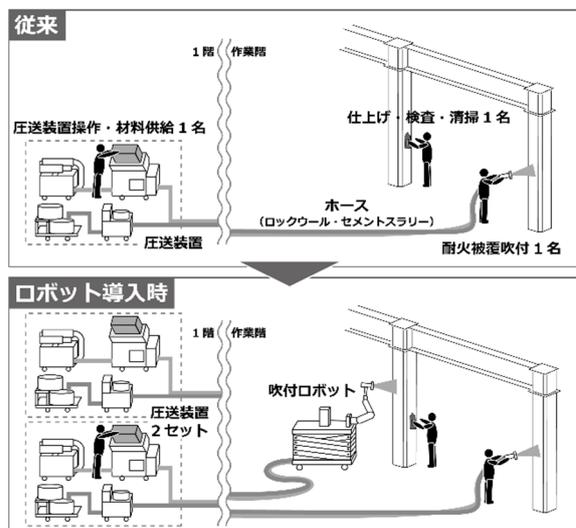


図1 吹付ロボット運用方法

### 3. 吹付ロボット開発内容

#### 3.1 ロボット概要

運用想定をふまえて開発した吹付ロボットを写真2に示す。本体寸法は幅 2300 mm 奥行 1200 mm 高さ 2100 mm で、総重量は 1400 kg となる。搬出入や現場内移動時には内部バッテリーで自走可能で、吹付作業時は三相 200 V 電源で稼働する。また、建物情報が記述されたロボット用図面データを読み込むことで現場内を半自律移動して吹付作業を実施する。以下にロボットを構成する移動機構、昇降機構、吹付機構、環境認識機能、動作計画ソフトウェア、操作デバイスについて記述する。

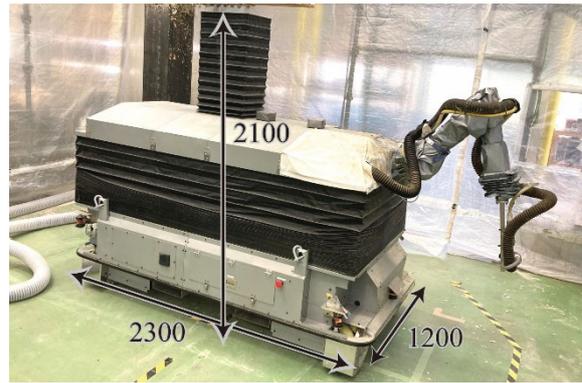


写真2 吹付ロボット

構造となっている。本構成は、油圧アクチュエータを斜めに取り付ける一般的な高所作業車と比較して、フレーム本数の削減とフレーム長の短縮が可能となり、小型化・軽量化を実現している。また昇降部は蛇腹型のカバーで覆われており、被覆材がロボット内部へ侵入することを防いでいる。

#### 3.2 移動機構

本ロボットの移動機構には、車輪としてメカナムホイールを採用した。4輪を個別に制御することで前後左右・斜め・その場転回等、全方向への移動が可能となる。そのため、移動誤差発生時の位置補正や、吹付位置変更時の繰り返し移動が不要となり、効率的かつ高精度な移動が実現できる。

車輪の回転方向は、ロボットアームの設置位置を吹付ロボット前方とすると、横方向に回転するように設置している。本ロボットは吹付作業時に横方向への移動を多用するため、上記の設置方法にすることで移動時誤差を小さくすることができる。また、建築用仮設エレベータは横長形状が一般的であるため、積載方向への段差踏破能力を高くする目的もある。走行性能は横方向への移動の場合、最大走行速度 150 mm/s、段差乗り越え高さ 80 mm、登坂可能傾斜 10°である。

#### 3.4 吹付機構

ロックウール・セメントスラリーは圧送装置から吹付ロボット後方部の接続口まで別々のホースを通して送られ、吹付ロボット内部を経由した後、ロボットアームの先端に取り付けられた吹付ノズルから吐出される。吹付ノズルの開閉はロボット内部に搭載したエアコンプレッサにより制御する。

吹付ノズルの位置調整には 6 軸の垂直多関節型ロボットアームを使用する。ロボットアームは水平方向に設置しており、手先の可動域は上下方向に広い。これにより比較的小型のロボットアームで柱最下部から梁最上部までの吹付を実現した。

#### 3.3 昇降機構

本ロボットは昇降機構を備えており、ロボットアーム設置高さを 1200 mm～6100 mm の範囲で昇降させることによって天井高 7000 mm の物件まで吹付可能である。最大昇降速度は 90 mm/s、最大上昇時での静止位置精度は上下方向に±5 mm、横方向に±10 mm である。動作時には、吹付ロボット上部に設置されたパッシブ型制振器が振動を抑制する。

昇降機構はパンタグラフ型フレームと、垂直方向に設置した電動リニアアクチュエータで構成される。昇降機構が最下部にある場合、アクチュエータが本体から突き出す形状となるが、高所作業車のように作業者が搭乗する必要がないため支障は生じない。上昇時にはアクチュエータがロボット内部に収納されるため、天井などとは衝突しない

#### 3.5 環境認識機能

本ロボットは、安全及び自己位置認識のために環境認識機能を備えている。

安全のための環境認識装置としては、2次元測域センサや接触式センサを設置している。測域センサは吹付ロボット前方部に設置され、ロボットアームが人や障害物に接触しないように、動作に合わせて検知範囲を変更しながら監視する。接触式センサは移動部外周にバンパー形状に設置され、障害物と接触した場合に即座に移動を停止させる。

自己位置認識のための環境認識装置としては、建設現場で一般的に使用されるトータルステーションを使用する。使用するトータルステーションは、レーザー光を照射する測量器が、ターゲットである検出器を追従して相対距離を測定するものである。検出器は図2に示すように、吹付ロボット

の四隅に設置している。4つの検出器をそれぞれ床面から異なる高さに取り付け、測量器が吹付ロボットのどの角を認識しているか判別させる。このうち測量器から見える2点を検出させることで吹付ロボットと測量器の相対位置と方向を特定する。さらに写真3のように、検出器を取り付けた器具を使用して現場座標を登録することでロボットと吹付対象の位置関係を特定させる。現場座標を特定するための計測位置は2本の柱の角部としている。本手法によって、吹付ロボットの移動位置精度は移動補正回数1回以内で位置誤差を30mm以下に抑えることができる。

### 3.6 動作計画ソフトウェア

吹付ロボットが現場内で自律的に行動するためには吹付ロボット自身が現場の情報を把握し、それを基に移動経路や吹付動作の計画を立てる必要がある。吹付ロボットが作業を実施するためのソフトウェア構成及びデータの流れを図3に示す。

昨今、建設業界では3Dモデルに建物情報を内包させたBIM (Building Information Modeling) を活用しての設計や検討が拡大している。そこでBIMデータから吹付ロボットが使用する現場情報を抽出し、吹付ロボットが認識できる形式であるロボット用図面データに変換する。変換ツールはBIMソフトウェア上で動く拡張機能として開発した。ロボット用図面データは、柱幅や長さ、梁のウェブ長、フランジ長、それぞれの位置関係などを独自規格に基づいて記述する。

ロボットアームの動作は吹付時の即応性を高めるためにオフラインティーチングで生成し、事前に衝突判定シミュレーションを行うことで安全性を確保する。本ロボットの対象とする柱・梁サイズは、JIS規格の中から12種の柱・42種の梁・各種サイズのボルト接合部とスチフナ部とした。これら部材の組み合わせや長さの違いは物件やフロアごとに異なり、無数に存在する。生成する動作数を最小化するため、部材形状の特徴に従って吹付範囲を適切に分割した。図4に代表的な分割例を示す。生成した動作はデータベース化する。

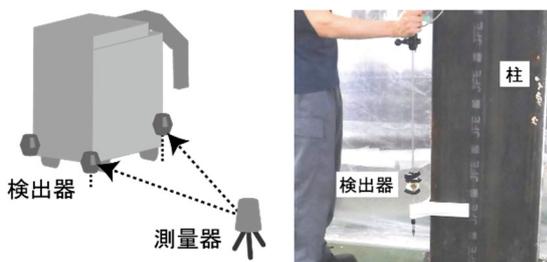


図2 自己位置認識

写真3 現場位置登録

吹付ロボットの移動経路や吹付動作は、ロボット用図面データを基に、予め設定した法則に従って自動的に計画される。施工現場の中で、4本の柱に囲まれた領域をセクション、梁に囲まれた領域をブロックと定義して移動経路を計画する。一度の動作指令はセクション単位で行い、セクション内の一連の動作を連続で実施する。吹付はブロック単位で周回し、ブロック内の吹付が完了した後、近接のブロックへ移動する。その際、ロボットに接続されたホースや電源が絡まないように特定の方向からの転回は反転する(図5)。吹付作業時のロボットアーム動作は、柱や梁のサイズに応じて動作データベースから適切に選択され、吹付ロボットの位置誤差が大きい場合は動作に補正をかけて実行される。

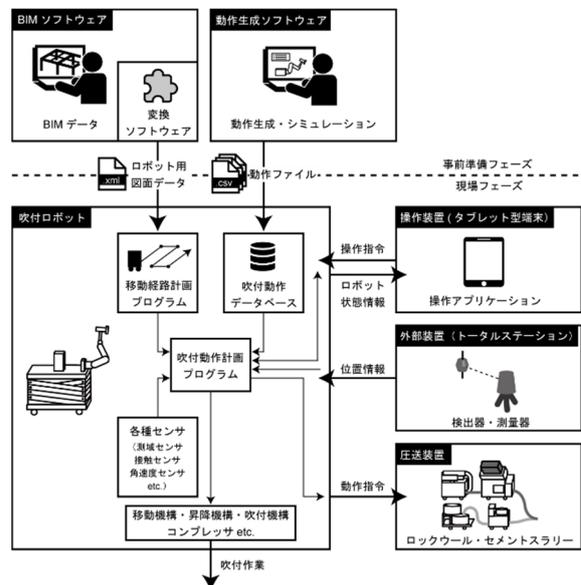


図3 ソフトウェア構成とデータフロー

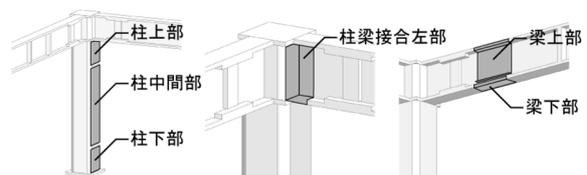


図4 動作分割例

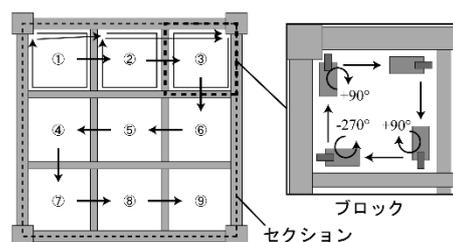


図5 移動経路

### 3.7 操作デバイス

本ロボットの操作デバイスとしては主にタブレット型端末を使用する。移動や昇降などの一部操作に関しては吹付ロボット本体に設置されたタッチパネル付きモニターやコントロールパッドを使用することもできるが、自律操作を指示するための機能はタブレット型端末上で作動するアプリケーション上に集約した。写真4にアプリケーション上に表示される操作画面を示す。作業区画の選択や吹付除外区画の指定、吹付時の経路プレビュー、吹付動作の開始・一時停止・再開等の操作を行える。また、吹付動作時以外の自走指令や圧送装置の吐出タイミング設定、異常発生時の警告表示等の機能を有する。

## 4. 現場実証

### 4.1 現場投入事例

2020年以降、本ロボットをいくつかの現場に投入し運用検証を実施した。本ロボットの想定する対象物件は主に物流倉庫などの大型施設であるが、それ以外にも小型物販店舗や大型物販店舗・複合宿泊施設にも投入し施工を実施した。施工物件の条件は、天井高3900mm～6300mm、セクション範囲6000mm×7000mm～9000mm×10000mm、1階または2階での施工である。以下に現場で吹付ロボットを運用した状況を記す。

### 4.2 現場搬出入

ロボットの現場への運搬は写真5のように、4t可搬の搭載型トラッククレーンを使用することが多い。圧送装置一式と吹付ロボットを同時に運搬し、現場到着後にトラックのクレーンで荷下ろしを行う。吹付ロボットの四方に設置された金具に吊りベルトを取り付けることで荷下ろしできることが確認できた。ただし天井高の低い物件の場合、



写真4 操作端末画面

吊り上げ時にクレーンのブームが天井に接触してしまう危険性があるため、屋外で荷下ろしをし、吹付ロボットの自走又はフォークリフトによる運搬によって屋内に搬入した。その際、砂利敷きや凹凸の大きい床面で吹付ロボットを自走させるとメカナムホイールが空転し、意図しない方向に進む可能性があるため、合板等の平滑な板を床面に敷く必要があった。

上階で吹付作業がある場合は写真6のように、場内クレーンを使用して揚重する。水平移動可能なクレーンを使用する場合には問題なく揚重できたが、クレーン設置部付近にロボットを下ろせる床がない場合には仮設床等を設置する必要があった。写真7のように狭小空間となる仮設床では吹付ロボットの移動が前後方向に制限され、傾斜や段差の踏破能力が落ちるため、スロープの設置方法には十分な注意が必要であった。

### 4.3 現場吹付作業

現場で吹付ロボットを稼働させる際は十分に安全対策を講じる必要がある。吹付ロボット自身のセンサに加え、吹付作業を実施する区画を養生シートとロードコーン・コーンバーで隔離し吹付ロボット操作者以外を立ち入り禁止とした。養生シート等の設置については従来施工でも必要となるため、作業時間に大きな変動はなかった。

吹付ロボットの操作は開発者だけでなく、普段吹付作業に従事する作業者によっても実施した。数分の操作説明を行うことでタブレット操作によるロボット移動、物件選択、現場位置やロボット位置の登録、作業開始指示等、問題なく実施できることが確認された。完全に覚えるまでは慣れが必要との意見はあったが、基本的な操作インターフェースに問題がないことが確認できた。

写真8に吹付ロボットによる施工時の写真を示



写真5 運搬荷姿



写真6 クレーン揚重



写真7 仮設床

す。柱と梁に対する吹付作業を行わせた結果、どちらに対しても耐火基準を満たす吹き付け品質の施工が行えていることが確認できた。吹付部位に対する施工速度と平滑度を表 1 に示す。施工速度は部位のサイズと形状に大きく依存し、柱に関しては作業員より速く、多くの梁に関しては作業員より遅い。平滑度に関しては柱については条件次第でロボットの方が平滑であるという意見もあった。しかし梁に関しては、まだ平滑度が十分ではない部分もあり、一部箇所についてはロボット作業終了後に作業員が補修することで対応した。

未施工箇所は想定より多く発生した。工程の関係上、先行して設備を設置する場合や、BIM データ上に記載されていない吊りボルト等の金具がある場合には、それら障害物が吹付ロボットと接触する危険があるため、該当する部分が未施工箇所となる。吹付ロボットを導入する場合、設備工程や BIM データの詳細度レベルも十分に検討しておく必要があることが確認できた。

被覆材の使用量は、材料の吐出タイミング調整や吹付時のノズル方向の微調整が難しく、作業員よりもロス率が高くなった。今後は動作の最適化を行い、吹付品質を向上させる必要がある。

メンテナンスに関しては、セメントスラリーがホース内で硬化しないよう使用後の清掃が必要であるが、問題なく実施できることが確認できた。

全体の施工速度に着目すると、吹付位置変更のための移動時間を含めると、平均して約 16m<sup>2</sup>/h であった。これは作業員による作業よりも遅い数値ではあるが、作業員とロボットが同時に 2 か所で吹付作業を行えるため、ロボットの準備や片付け、補修時間を加味しても、作業員だけで施工した場合とロボットを投入した場合との比較では工期を約 3 割削減することができる結果となった。

## 5. おわりに

本報では、耐火被覆吹付工事の作業負担軽減と労働生産性向上を目的として開発した吹付ロボットについて概説し、実現場での検証結果を報告した。検証の結果、吹付ロボットによる吹付作業が実施可能であることが分かったが、課題も明らかになった。最も大きな課題は吹付ロボットのサイズと重量であると考えられる。搬出入時の可搬性向上のためのみならず、小型物件での運用も視野に入れ、小型軽量化の検討が必要である。今後は現場検証によって判明した課題を解決し、吹付ロボットをより実用性の高いものを目指す。



写真 8 吹付ロボットによる現場施工

表 1 吹付ロボットの施工速度と平滑度

吹付部位	施工速度		平滑度	
	柱	梁	柱	梁
作業員	平均 20 m <sup>2</sup> /h		○	○
吹付ロボット	23 ~ 34 m <sup>2</sup> /h	10 ~ 30 m <sup>2</sup> /h	○	△

## 謝辞

吹付ロボットはエス.ラボ株式会社の協力によって開発された。また、現場検証は施主様の許可のもと行われた。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 野中 稔, 庄川 選男, 吉田 哲二: 耐火被覆吹付ロボットの開発: その 1 開発の目的とロボット, 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol.58, pp503-504, 1983.
- 2) “「耐火被覆吹付ロボット」の開発および実証実験の実施”, 大和ハウス工業, 2018-4-16, <https://www.daiwahouse.com/about/release/house/20180416111302.html>, (2024-8-23)

## 執筆者紹介



野村 勇樹  
博士 (工学)

### ひとこと

建築現場のように厳しい環境でこそ、機械化・自動化技術が必要になると考えています。課題は多くありますがひとつひとつ解決していきたいと考えています。