

アスベスト除去ロボットの開発と適用

Development and Application of Asbestos Processing Robot

星野 春夫*1 洗 光範*2 菅田 昌宏*1
林田 英俊*3 田澤 修平*4

梗概

アスベスト吹付け材の除去作業は部屋全体を隔離養生した中で防護服を着けて行う過酷な作業である。本開発では、鉄骨耐火被覆等のアスベスト吹付け材を遠隔操作で安全に効率よく除去して梱包するアスベスト除去ロボットシステムを開発した。システムは、自走式昇降台車に架装した7軸ロボットアームと先端の剥離装置および削り取った吹付け材を吸引して袋詰めする回収装置などから構成され、アスベストを飛散させることなく剥離処理ができる。本論文では、システムの開発の概要と実工事における施工実験結果について述べる。

キーワード：アスベスト吹付け材，剥離ロボット，クローズ型処理システム，粉塵飛散防止

Summary

Sprayed asbestos removal work is very hard work to eliminate manually by workers wearing protective clothing and masks in a perfectly isolated room. Our robotic system can remove asbestos sprayed on a steel beam, and suction and bagging up the asbestos. This robot has 7-DOF manipulator mounted on a mobile elevating platform, which is operated remotely from outside. The robot system can remove asbestos safely without disperse the asbestos to outside. On the actual demolition site, we tried to remove asbestos using this robotic system. As a result, we confirmed the work efficiency and the practical problems.

Keywords: sprayed asbestos, removing robot, closed processing system, prevention of dust dispersion

1 はじめに

アスベスト吹付け材（吹付けアスベスト，アスベスト含有吹付けロックウール等）は、耐熱性、耐摩耗性に優れた材料として、1950年頃から1989年頃まで建物の耐火被覆や保温材、吸音材等に広く使用されてきた。上記期間に建造され30年以上の使用を経た建物の解体やリニューアルが今後増加し、数十年間継続することが想定されている。建物の解体や大規模なリニューアル工事では事前にアスベスト吹付け材を除去する必要があるが、除去作業はアスベスト飛散防止のため部屋全体を隔離養生した中で、防護服とマスクを着けた作業員が手作業で除去する非常に過酷な作業である。また、部屋全体の養生の設置・撤去に多大な手間と費用がかかるとともに、養生の隙間などからのアスベストの飛散のリスクもある。

このような背景から、原則使用が禁止される1975年頃まで大量に使用されてきた乾式・半乾式のアスベスト吹付け材を対象として、多自由度マニピュレータを用いて粉塵を飛散させることなく剥離・回収する除去ロボットシステムを開発し、アスベスト代替の半乾式のロックウールを吹付けた鉄骨梁モックアップを用いて剥離実験を行ってその性能を確認した。次に、開発した除去ロボットシステムを、乾式・半乾式より飛散し難いため1989年ころまで使用されていた湿式のアスベスト吹付け材に対応させるとともに、高所の梁、天井等を施工可能とするためマニピュレータを自走式昇降台車に搭載し、剥離したアスベストをバキュームで回収・袋詰めする実用的な一連のシステムを開発した。開発した一連のシステムを用いて鉄骨梁モックアップにより性能確認実験を行った後、実際のビル解体現場で実現現場における剥離施工実験を行い、実用性を確認するとともに問題点を把握した。

*1 技術研究所 主任研究員 博士(工学) Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.
*2 技術研究所 主任研究員 Chief Researcher, Research & Development Institute
*3 技術研究所 部長 博士(工学) General Manager, Research & Development Institute, Dr. Eng.
*4 東京本店 作業所 Tokyo main office

2 乾式・半乾式吹付けアスベスト除去ロボット

2.1 システムの開発目標

アスベスト吹付け材は鉄骨造建物の耐火被覆として、湿式のアスベスト含有吹付けロックウールも含めると1989年頃まで大量に使用されており、このような建物の解体やリニューアル工事に伴うアスベスト除去工事が増加している。特に高層・超高層建物では、今後大規模なリニューアル工事が需要が顕在化すると考えられ、鉄骨を傷つけたり周囲を汚したりすることなく安全に、効率よく鉄骨のアスベスト吹付け材を除去する技術が必要とされる。そこで本システム開発では、①鉄骨等のアスベスト吹付け材の除去作業を対象とし、②リニューアル工事にも適用可能、③作業のロボット化による労働環境の向上、④本設エレベータで搬送可能なコンパクトなシステム等を開発目標として、現状で行われている除去工事において主要な除去対象となっている乾式・半乾式のアスベスト吹付け材の除去ロボットを開発した。

2.2 多自由度マニピュレータ

本開発ではリニューアル時の鉄骨のアスベスト吹付け材の除去を対象としており、狭い場所で鉄骨を傷つけることなく、向きの異なるウェブ面やフランジ面でジョイント部や貫通孔、補強プレート等のある複雑な形状に追従する必要がある。このような動作を可能とするため、障害物を避けながら多様な姿勢をとることが可能な7自由度マニピュレータを用いて隔離区域の外から遠隔操作が可能なシステムを実現した。使用したマニピュレータは、剥離作業に十分な能力を有し、障害物を避けた作業が可能となる7自由度の市販のロボット（安川電機MOTOMAN-IA20、可搬質量20kg、動作半径1140mm）を選定した（Table 1）。建物の鉄骨等は多くの部位でほぼ同様な形状であるため、マニピュレータの制御は予めティーチングした基本作業プログラムを、作業時に作業範囲や速度等のパラメータを設定してプレイバックする方式を前提とした。

Table 1 マニピュレータ仕様
Manipulator specification

名 称	MOTOMAN-IA20	
構 造	7自由度多関節形	
可搬質量	20 kg	
位置決め精度	±0.1 mm	
本体質量	120 kg	
電源容量	3.4 kVA	

2.3 力制御

工場で精密に据付けられたロボットはティーチングプレイバックにより高精度で高速な作業を行うことができるが、本開発のようにロボットが移動して作業を行う場合ロボットを精度よく設置することは困難である。このような設置誤差を吸収し、工具の押し付け力を一定に保ってスムーズな剥離を行うため、アーム先端に6軸力センサを取り付けて力制御を行った。

Table 2 剥離装置
Removing devices

2.4 剥離装置

人手でアスベスト吹付け材を剥離する場合、スクレーパやケレン棒を使用して掻き落とし、残った付着物をブラシや研磨用スポンジ等で削り取る方法が一般的である。現状のロボット技術では突く、叩くなどの作業は困難であるため、市販の電動工具から振動スクレーパとスクリュー型カッターおよび仕上げ用の不織布グラインダーについて検討した（Table 2）。振動スクレーパは一定の力をかけることで振動が発生して剥離が行える。スクリュー型カッターはスクリューの端面と側面に刃を付けた形状の回転式切削刃であり、不織布グラインダーは研磨剤を含有した柔軟性のある不織布でできたグラインダーである。これらの剥離工具は力制御により一定の押し付け力を加える必要があり、剥離時に必要な力を実験により把握した。

①振動スクレーパ 消費電力：505W 振動数：0～3200rpm	
②スクリューカッター 消費電力：380W 回転数：1250rpm	
③不織布グラインダー 消費電力：500W 回転数：500～2300rpm	

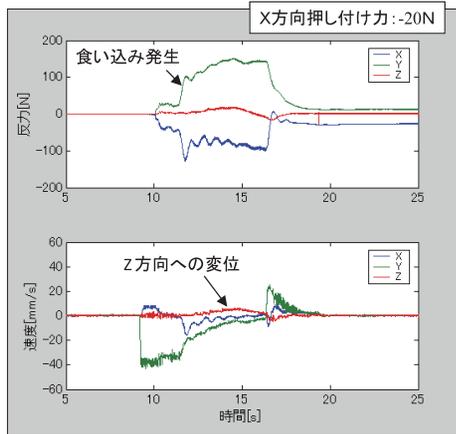


Fig.1 剥離実験 (1)
Removing Experiments(1)

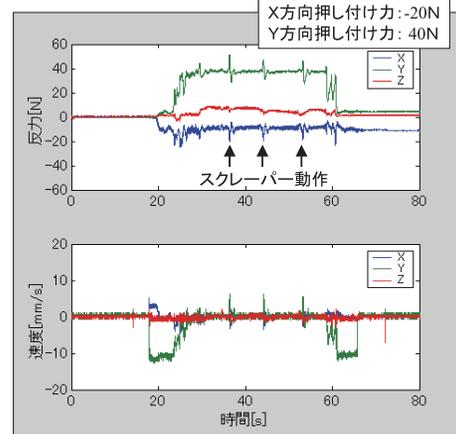


Fig.2 剥離実験 (2)
Removing Experiments(2)

振動スクレーパの場合、押し付け力のみでは効果的な振動が得られず、Fig.1に示すように刃先が食い込んで過大な力が発生するとともに進行方向と直角方向（Z方向）への変位が生じ、効果的に振動を発生させるためには、押し付け方向と進行方向の2方向への力制御とスクレーパの迎え角を適切に設定する必要がある。Fig.2にスクレーパ迎え角30°、押し付け力20N、進行方向40Nで剥離実験を行った結果を示す。刃先が止められても力が目標通りに制御されて過大な力が発生せず、断続的にスクレーパの振動が動作して剥離が再開されていることが分かる。

スクリーカッタは振動スクレーパと異なり食い込むことがないため、進行方向の力制御は行わずに押し付け力20Nでスムーズに剥離が可能であったが10mm程度の厚さが剥離残しとなった。そこで、粗剥離をスクリーカッタで行い、残った厚さ10mm程度を振動スクレーパで掻き落とす方式とした。振動スクレーパでは強固に付着した部分が残るため柔軟性のある不織布のグラインダーを電動ドリルに取り付けて仕上げ剥離を行うこととした。

2.5 半乾式モックアップ剥離実験

実大規模の実験を行うため、全体をシートで囲った鉄骨梁（H-488×300×11×28）のモックアップを製作し、アスベストの代替として厚さ25mmの半乾式のロックウールを吹付け、人手作業による剥離と開発した剥離ロボットによる剥離作業を実施して作業効率および剥離品質等を比較した。

人手による剥離実験は、1名の作業員により長さ4mの鉄骨梁の片



Photo 1 人手作業の状況
Situation of Manual Work



Photo 2 剥離ロボットの作業状況
Situation of Robot Work

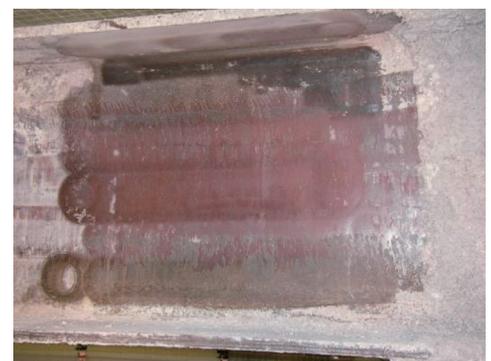


Photo 3 剥離後の鉄骨状況
Condition of Removed Steel Surface

Table 3 剥離実験条件
Removing Experimental Condition

剥離段階	使用工具	剥離条件
①粗剥離	スクリーカッタ	押付け力：20N 剥離速度：10cm/sec
②中仕上げ	振動スクレーパ	押付け力：10N 進行方向：40N 剥離速度：5cm/sec
③仕上げ	不織布グラインダー	押付け力：10N 剥離速度：5cm/sec

面を実際と同様な作業により剥離し、作業手順と時間および剥離後の仕上げの程度を解析した。作業は完全防護服を着用して飛散防止用の薬剤を噴霧しながら行われた (Photo 1)。

剥離ロボットによる剥離作業はTable 3に示す3段階を順に行うことではほぼスムーズに剥離を行うことができた。スクリーカッターは粉塵発生が大きいので、噴霧器で散水しながら剥離を行ったが、振動スクレーパおよびグラインダーについては作業開始前に十分散水しておくことで剥離中の散水は不要であった (Photo 2)。剥離実験結果から推定すると本システムの作業能率は1.5m²/hと算出され、これは人手作業の約3.0倍であった。仕上げ面は人手で丁寧に仕上げた面と同等な品質が得られた (Photo 3)。

3 湿式吹付けアスベスト除去ロボット

3.1 システム構成

開発した乾式・半乾式吹き付けアスベストを対象とした除去ロボットを基にして、固く吹き付けられているため手作業では非常に力と手間を要する湿式吹き付けアスベスト除去ロボットシステムを開発した。開発システムは鉄骨梁等の耐火被覆の剥離も対象としているため、マニピュレータを梁付近まで持ち上げて固定する必要がある。そこで、遠隔操作可能な走行式昇降台車にマニピュレータを搭載し、高所における作業時のマニピュレータの揺れを防止するため、台車の昇降マスト上部に高さ調整可能な固定用ピースを設け、スラブ下に押し付けてロボットを固定する方式とした (Fig.3)。

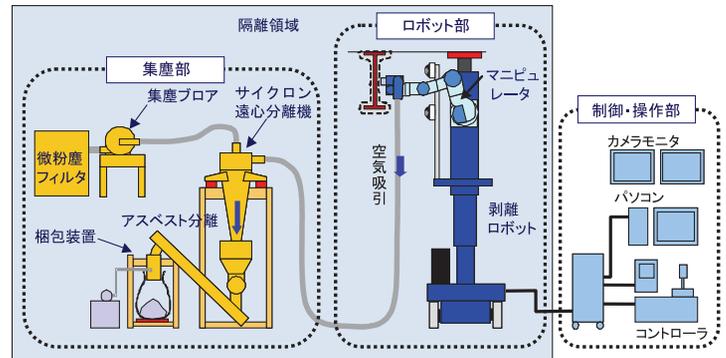


Fig.3 湿式アスベスト除去ロボット
Wet Sprayed Asbestos Processing Robot

3.2 制御装置

アスベスト除去ロボットでは、マスト昇降、ティーチングプレイバックによる自動作業およびジョイスティックによる手動操作等の作業を、カメラモニターを確認しながら安全な場所から遠隔操作する必要がある。マニピュレータの遠隔制御のため、シミュレーションソフトと通信機能を利用した遠隔操作システムを開発した (Fig.4)。予めベースとなる定形作業をシミュレーションソフトによりオフラインのパソコン上でティーチングし、動作やツールの軌跡、干渉などをチェックしておく。この動作プログラムをイーサネット機能でマニピュレータのコントローラに転送することにより、現場では剥離作業の開始点と範囲の指定等を行うことで遠隔操作による自動剥離作業を行うことができる。走行および位置決めは、床に墨出ししたラインを走行台車の前後に設置したカメラで確認しながら操作機で遠隔操作する。制御システムをPhoto 4に示す。

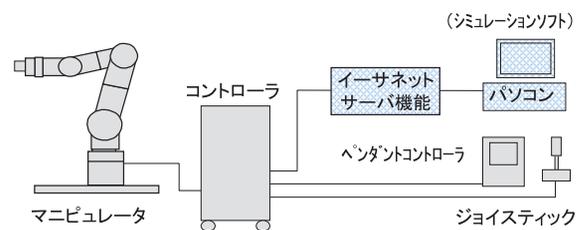


Fig.4 マニピュレータ制御システム
Manipulator Control System



Photo 4 制御システム
Control Console

3.3 剥離装置

湿式のアスベスト吹き付け材の物性を推測するため、代替としてロックウールの試験体を作成して強度試験を行った結果、湿式では曲げ、圧縮強度が半乾式の7倍近くあり、乾式・半乾式を対象とした剥離装置では剥離が困難であった。そこで、ジェットタガネ、高周波振動スクレーパ、回転切削ビット、回転ブラシ等の工具を用いて厚さ25mmの湿式吹き付けロック



Photo 5 回転ブラシ形剥離装置
Removing wheel brush

ウール剥離の比較実験を行った。その結果、ジェットタガネや振動スクレーパでは剥離対象が固いためロボットでは困難であり、回転切削ビットは鉄骨と接触による破損等の問題があったが、回転ブラシは3000rpm程度で比較的安定して効率よく剥離が可能であった。また、回転ブラシは粗剥離から仕上げまで行うことができ、工具交換を必要とせず最適であったが、高速回転するブラシにより粉碎された粉塵が大量に生じ、遠心力により吹き飛ばされて周囲に飛散するという問題があった。そこで、ブラシの周囲を集塵カバーで覆って直接バキュームで吸引することとした (Photo 5)。また、高トルクの回転力と高速回転速度を得るため、モーターは走行台車のプラットフォーム上に別置きし、ブラシとの間をフレキシブルシャフトにて連結して回転力を伝達する方式とした (Fig.5)。

剥離時には剥離面に対してブラシを直角に当てる必要があるが、マニピュレータ軸に対してブラシの回転軸を90°にブラシを取り付け、剥離しようとする時、マニピュレータ肘部関節の必要移動範囲が大きくなりマニピュレータの動作範囲が狭くなる。また、鉄骨梁のウェブとフランジの入隅などでは、マニピュレータのボディや吸引ホース等が鉄骨や躯体に干渉し、そのままでは剥離装置が届かず、場合によってはロボットの設置位置を移動させなければならないことが分かった。そこでツールの取り付け角度をマニピュレータ軸に対して45°傾けて取り付けることにより、動作死角の少ないより広い剥離可能範囲を確保した (Fig.5)。

3.4 回収装置

本システムでは、粉体状に剥離したアスベストを剥離装置からバキュームで吸引してサイクロンで空気と分離してロータリバルブで排出してスクリーコンベアを介して袋詰めする (Fig.3)。ロータリバルブにより密閉性が保たれるため回収袋の交換時に剥離作業を停止する必要がない。アスベストの剥離作業と並行して袋詰めを同時に行え、周辺を汚すことがないため、従来作業で必要であった掻き落としたアスベストの回収・袋詰めと清掃する作業が軽減可能である。

3.5 湿式モックアップ剥離実験

実大規模の実証実験を行うため、鉄骨梁のモックアップを製作した。実験時の粉塵の外部飛散を防止するため屋内に外寸法で幅6.7m×奥行5m×高さ3.7mの鉄骨フレームを組み、パネルとポリシートで密閉した実大実証実験室を製作して鉄骨梁モックアップ (H-488×300×11×18) を鉄骨下端の高さが3mとなるように設置した。アスベストの代替として厚さ45mmの湿式吹付けロックウールを吹き付けて1ヵ月以上養生した。吹付け厚さは20mm～50mm程度のばらつきがあり、ロボット剥離性能の定量的な確認が難しいと考えられるため、定量的な剥離性能を把握するため1m×1mの鉄板に厚さ20～25mmにコテ塗りした平板モックアップを天井面に取り付けた。パソコンのシミュレーションソフトでオフラインティーチングによりジョブプログラムを作成して、回転ブラシ (径125mmφ、幅50mm、3000rpm) によるモックアップの剥離実験を行った。

Photo 6, 7に天井部剥離実験の状況を示し、Photo 8に剥離後の鉄

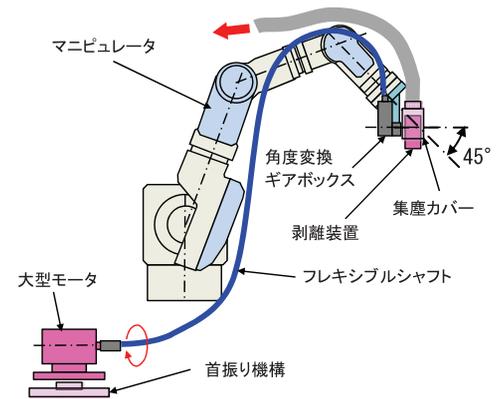


Fig. 5 動力伝達機構
Rotation Transmission for Wheel Brush



Photo 6 剥離実験状況
Situation of Removing Experiments



Photo 7 天井部剥離実験
Removing Experiment on Ceiling



Photo 8 剥離後の鉄骨状況
Condition of Removed Steel Surface

骨表面の状況を示す。剥離実験の結果、押し付け力20N、剥離目標軌道を鉄骨面-20mmの条件で最大100mm/sec（剥離面積18m²/h）の速度で剥離が可能であったが、力制御による押し付け力が安定するまで時間を要し、剥離残しを回避するために押し付け時に3~5秒のタイマーを設ける必要があった。これらの力制御パラメータは対象物の種類や固さなどの物性により最適値が異なると考えられるため、実際の施工時には現地でテストして調整する必要がある。剥離装置の構造上剥離可能な吹付け厚さは最大35mmであり、35mmを超える場合は同じ作業を繰り返す必要があった。

4 実現場における施工実験

4.1 実験概要

実際の工事現場で当システム全体を使用するのは今回が最初であるため、確実に剥離可能な条件設定を行い、システムの搬入・組立から剥離作業、移設・解体・搬出等の一連の作業手順、工程等を確認することとした。対象建物は40年近く前に竣工した25階建、延床面積約48,000m²の高層オフィスビルで、鉄骨梁の全面に半乾式のアスベスト吹付け材が施工されている。施工実験を行った場所をFig.7に、対象とした鉄骨梁の形状をFig.8に示す。ロボットシステム適用のためにセキュリティゾーンのサイズを拡大し、ロボット走行部の床面の養生は粘着剤加工ポリシート2枚貼りとしてロボット走行時の車輪へのシートの巻き込みを防止した。ロボットの走行、位置決め用に粘着シートの上に墨を出し、テープでマーキングした。また、隔離養生内に持ち込むロボットシステム及びケーブル等を含めた全ての装置は、不敷布とポリシートにより養生した。

4.2 実施システム概要

Fig.3に示したシステム基本構成は完全無人化を想定し、剥離作業を停止することなく梱包作業及び袋の交換を行えるように、サイクロン分離機からロータリバルブを介して梱包装置に供給する構成となっている。今回の実験では動作監視と作業補助のために最小限の人員を隔離養生内に配置することを前提としたため、Fig.7に示すようにロータリバルブを外し、専用ポリ袋をセットした回収容器を直接サイクロン分離機に取り付けて、コンパクト化を計った。

4.3 動作プログラム

対象の大梁には、開口補強パイプや斜めスティフナが多くあり、これらを避けて、ロボット装置1回の設置位置において可能な限り剥離面積を大きくとれる条件として、剥離長さを800mmと設定した。梁の片側を各フランジ面とウェブ面を上下に2分割した5面に分けて、それぞれの面の剥離を行うマニピュレータの動作プログラムを、パソコン上でシミュレートしながら作成した(Fig.8)。マニピュレータの1パス(片道)での剥離幅は、回転ブラシの厚みの約50mmであるため、パス間の移動量を50mmとした。剥離速度は、これまでの実験室実験では最大100mm/secを確認しているが、初めての実施工実験であるため、確実に剥離

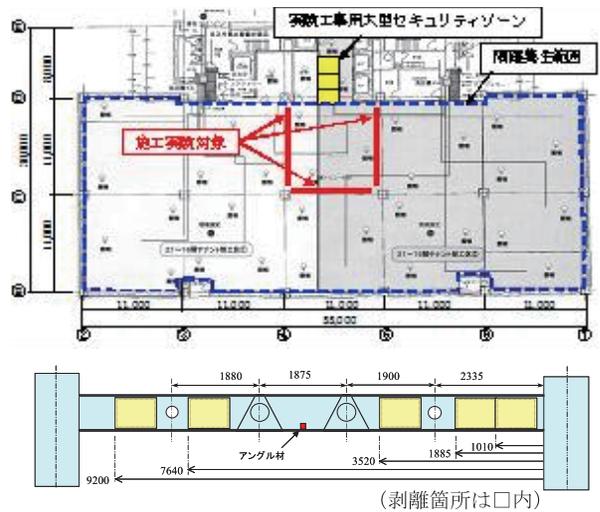


Fig.6 実験現場の概要
Outline of Experimental Site

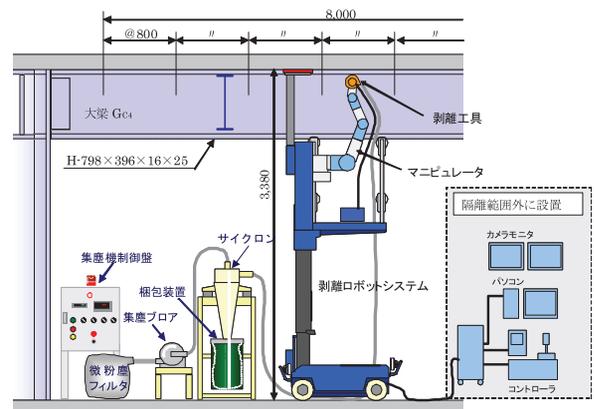


Fig.7 実施システム概要
Outline of Removing Robot System

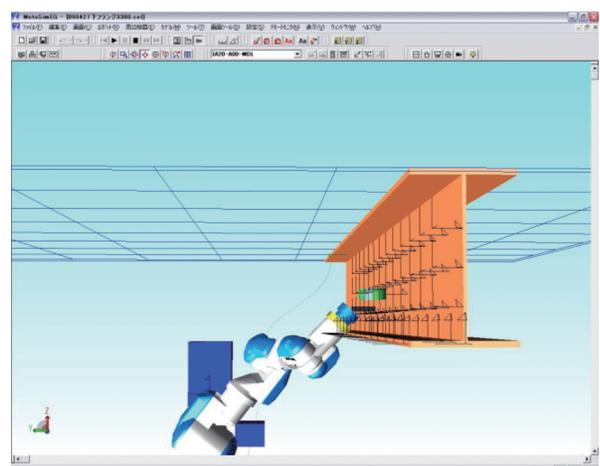


Fig.8 剥離プログラム作成
Programming of Removing Work

が可能な47mm/secとした。また、アスベスト吹付け材の厚さが40～60mmと厚いため、厚さ方向には2回での剥離を基本とし、実際には目視により剥離状況を確認し、鉄骨面が見えるまで繰り返し行った。設定した動作速度で2回剥離を行った場合、段取り替えや移動・位置決めに必要な時間を除いた実剥離速度は2.6m²/hである。

4.4 実験結果

合計面積15.2m²の剥離実験を実施した結果、動作プログラムの不具合による押付力不足や剥離装置部品の破損等のトラブルは発生したがその都度対処することで、大きな問題はなく予定通りの一連の実験を行うことができた。実験状況をPhoto 9に示し、操作室の状況をPhoto 10に示す。アスベスト剥離後の状況は鉄骨の塗装面が見える非常に綺麗な仕上がりとなっているが (Photo 11)、アスベスト吹付け材の厚さや強度のムラによると思われる各パスの始点、終点位置の多少の誤差がみられる。

剥離作業時間を分析した結果をFig.9, Fig.10に示す。合計15.2m²の剥離を行った結果から、トラブル等で停止した作業を除いた場合の総合的な作業速度は0.99m²/hであり、これは施工業者へのアンケート結果の人で作業速度の1.24倍であった。作業時間の内訳は実剥離時間が66%、段取り替えや移動位置決め等に要する時間が34%の比率であった。

2回剥離で終了した作業を抽出すると、段取り替えや移動位置決め等を除いた実剥離速度は2.38m²/hであり、設定した動作速度で2回剥離を行った場合のプログラム上の実剥離速度 (2.6m²/h) に近いほぼ計画通りの値が得られている。両者の差は、実際の剥離では力制御が安定するまでの押付け時間が、プログラム上の押し付け時間より2～5秒程度多く要しているためと考えられる。

マニピュレータの動作速度はこれまでの実験室実験で最大100mm/secが得られており、剥離速度を高速化することが可能と考えられる。また、作業手順の検討、作業プログラムの改良により移動設置等の付帯作業の時間短縮を図ることで作業効率を向上させることが可能と考えられ、ロボットシステムを適用することでコスト的にもメリットが生じるものと考えられる。



Photo 9 実験場における実験状況
Experiment on Actual Site



Photo 10 操作室の状況
Situation of Control Room



Photo 11 剥離後の鉄骨状況
Condition of Removed Steel Surface



Fig.9 剥離作業時間
Removal Work Time



Fig.10 剥離時間の内訳
Breakdown of Removing Time

5 まとめ

人手では非常に過酷である鉄骨等のアスベスト吹付け材の除去工事の自動化、無人化を目指し、自走式走行台車に7自由度マニピュレータを搭載した剥離ロボットおよびシミュレーションソフトと通信機能を利用して遠隔操作でティーチングと自動剥離、手動遠隔操作等を可能とした7自由度マニピュレータ制御システムを開発し、乾式・半乾式のアスベスト吹付け材の剥離を目的としたスクリーカッタ、振動スクレーパ等剥離装置の開発と湿式のアスベスト吹付け材に対応した回転ブラシと空気吸引により袋詰めまで一貫したアスベスト除去ロボットを開発して一連のシステムを試作した。屋内剥離実験によりその可能性と実用的な性能を確認し、次に実際のアスベスト剥離工事現場における剥離施工実験を行った結果、一連の作業をほぼ計画通りスムーズに行うことができた。今後は、剥離装置の性能向上と全体システム構築と改善を図り、実際の現場でも十分効率的に作業可能なシステムとして実用化していきたい。

謝辞

本研究開発は、新エネルギー・産業技術総合開発機構の平成18年度研究開発「緊急アスベスト削減実用化基盤技術開発（吹付けアスベストを安全に剥離・圧縮・梱包できるクローズ型処理システムの研究開発）」および平成19年度～20年度「アスベスト含有建材等安全回収・処理等技術開発」の委託を受けて実施したものです。本研究開発の遂行にあたり多大なご指導、ご協力を頂いた関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 星野春夫, 嘉本敬樹, 竹内誠一:「吹付けアスベストの高機能クローズ型処理ロボットの開発」, 第11回建設ロボットシンポジウム, 2008
- 2) 星野春夫, 嘉本敬樹, 菅田昌宏, 竹内誠一:「吹付けアスベストのクローズ型除去ロボットシステムの開発」, 第17回建築施工ロボットシンポジウム, 2008
- 3) 内藤龍夫:「分かりやすい建築技術 建築の耐火被覆工法」, 鹿島出版会