ロボットを使った乾式系吹付けアスベスト除去・回収

システム実証試験結果及び作業環境の検討

森　直樹*1・長瀬　公一*1・大山　能永*2
久保木　久仁彦*2・村田　勤*2・石原　哲*3

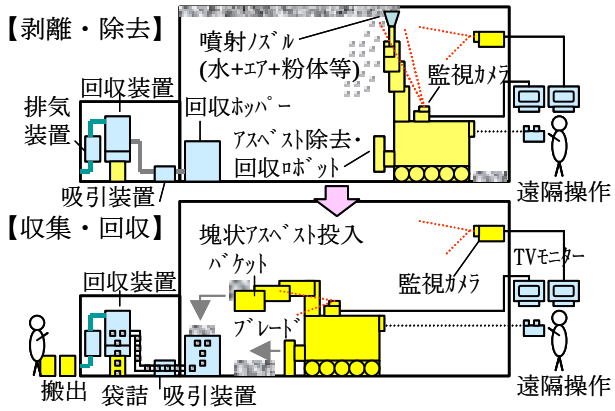
Keywords : dry sprayed asbestos,robot,remote control, building dismantling
乾式系吹付けアスベスト、ロボット、遠隔操作、建物解体

1.　はじめに

吹付アスベストは，その不燃性，耐火性や断熱性，吸音性などに優れていることから，過去において，建物の天井や壁，柱，梁などに吹付施工等がなされてきた。しかしながら，経年劣化などにより，その吹付表面からアスベスト繊維が空気中に浮遊飛散し，肺ガンや中皮腫，石綿肺といった人体の健康に悪影響を与える要因となることが指摘されており，その除去が急務となっている。その除去方法は，防塵マスク，保護衣を着用した完全防備の専門の作業員が，密閉された室内に隔離されて，ケレン棒やワイヤーブラシなどを使って吹付アスベストを剥離・除去するのが現状である。これは有害なアスベストを取り除くという根本的な解決に繋がるものの，作業者が手作業で除去するということは多大な手間を要し，工事費の高騰を招いてしまうとともに，作業者の健康被害を引き起こしてしまうことも懸念される。これは，今後アスベスト問題の解決に対して大きな障害となる。そこで，我々は主に建物解体時における乾式系吹付アスベストの除去，及び回収作業を遠隔操作によるアスベスト除去・回収ロボットによって安全かつ効率的にできるシステムを開発し，実験室レベルでの実証試験を行ったので，そのシステム概要及び実証試験結果について報告する。また作業環境の実状や無人化のレベルを踏まえた上で，実証試験時の作業環境について検討したので，その結果も含め，以下に報告する。

2.　システム概要

吹付けアスベストの無人化除去・回収システムの流れを図－1 に示す。



図－1　吹付アスベスト除去から回収までの流れ

Fig.1 Flows from dry-sprayed-asbestos removal to collection

2.1　アスベスト除去・回収ロボット

2.1.1　ロボット本体

アスベスト除去・回収ロボットの主な仕様を表－1 に示す。本体ベースマシンは３アーム構造となっており，吹付けアスベスト除去時の防汚対策として専用のカバーを取り付けた。また本ロボットは遠隔操作が標準装備されている。写真－1 にロボット外観を示す。

表－1 ロボット主な仕様

Table1 Robot specifications

全長	1,821mm(輸送時)
全幅	780mm(輸送時) 1,586mm(稼働時)
全高	1,210mm(最低) 3,600mm(最高)
重量	930kg(ｱﾀｯﾁﾒﾝﾄ無)
出力	11kW
制御	有線/無線

写真－1 ロボット外観図

Photo1 Robot appearance

＊1　技術センター　建築技術開発部建築生産技術開発室
＊2　建築本部　技術部
＊3　原子力本部　デコミッショニング部

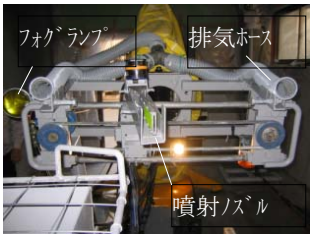
2.1.2　ノズルスライド装置

建物の各部位に吹付けられている吹付けアスベストを剥離・除去するために，混気ジェット（高圧水＋圧縮空気＋研削材＋高分子吸収剤）を噴射するノズルをロボットアーム先端部に装着した。また，噴射ノズルは吹付けアスベスト施工面に対して鉛直方向に一定の斜行角度を持たせて往復移動できるようになっており，更に常時アスベスト面を削ぎ落とすようにノズル噴射角度の向きを変えられる機構を採用した。混気ジェット物の主な仕様を表－2 に，ノズルスライド装置の外観を写真－2 に示す。

表－2 混気ジェット構成物

Table2 Mixed jet air specifications

使用水量	5.4L/min
吐出圧力	30-140kgf/cm^2
研削材	炭酸ｶﾙｼｳﾑ、重曹等
吸水剤	高分子吸収剤



写真－2 ノズルスライド装置

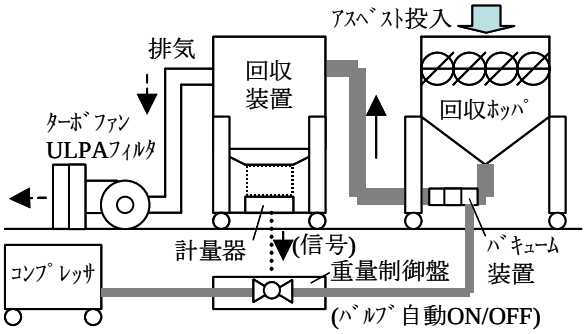
Photo2 Nozzle slide device

2.1.3　車載用モニターカメラ

吹付けアスベストの除去・回収を作業区域内で遠隔操作によるロボットで行うための作業監視用モニターカメラをロボット胴体部分に設置した。また室内にはロボット作業を監視するためのモニターカメラも設置した。

2.2　アスベスト回収システム

アスベスト回収システムの概要を図－2 に示す。



図－2　アスベスト回収システム概要

Fig.2 Dry-sprayed-asbestos collection system

2.2.1　回収ホッパー

ロボットにより収集されたアスベストを所定の回収袋に圧送するための回収ホッパーを設置した。本装置の投入口には，ロボットにより剥離・除去された塊状のアスベストを粉砕するための破砕機構を組み込んだ。

2.2.2　バキューム装置

アスベストを回収ホッパーから圧送するためのバキューム装置を回収ホッパー排出部分に取り付けた。

2.2.3　回収装置

圧送されたアスベストを所定の回収袋に重量制御によって一定量袋詰め（1 重）するための装置を設置した。

2.2.4　回収袋受け渡し装置

回収装置により 1 重状態で袋詰めされたアスベストを 2 重袋詰めの状態として安全区域に手渡すためのパスボックス装置を別に設置した。

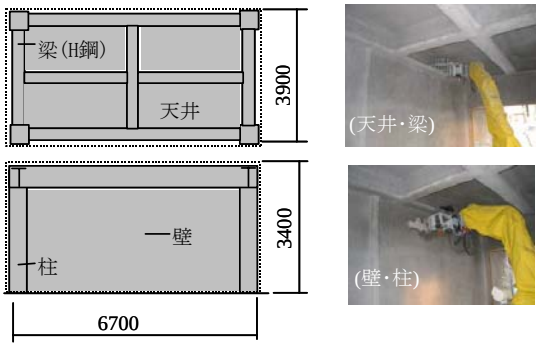
3.　実証試験概要

アスベスト無人化除去・回収システムの諸性能について実験室レベルでの実証試験を行った。

（実証試験期間：2006 年 10 月～2007 年 2 月）

3.1　実証試験施設

実証試験施設の概要を図－3 に示す。今回の除去・回収の対象物はアスベスト代替物としてロックウールを使用し，施設内の H 鋼梁・柱部分：45mm 厚，他の天井・壁部分：15mm 厚で吹付け工事を行い，約 1 ヶ月の養生期間を経た後に実証試験を行った。



図－3　実証試験施設の概要

Fig.3 Proof examination institution

3.2　実証試験結果、及び考察

3.2.1　アスベスト除去・回収ロボットの除去性能

今回のロボット遠隔操作によるノズル往復移動速度は，おおよそ 5～6cm/secであり，壁面等の単純なモデルアスベスト（ロックウール）面（15mm厚）の場合は，ノズルを 0.5 往復（片道移動）させるだけで，瞬時に縦 10cm程度の帯状の下地面が現れ，確実にモデルアスベストを除去できることが確認できた。これを単位時間当りの除去面積に換算すると約 18～22m^2/h となり，

実際には板状に削ぎ剥がされる効果も期待できることから，20m^2/h 以上の除去性能があるものと考える。しかし，梁部等のH鋼面（45mm厚）の場合は，ノズルを 2 往復以上横行させないと下地面が現れて来ず，また凹凸面であることからノズルスライド装置の位置を調整する必要があり，現状では約 4～5m^2/h 程度になるものと推測される。ロボット遠隔操作によるH鋼面除去後の状況を写真－3 に示す。

写真－3　除去後の H 鋼面

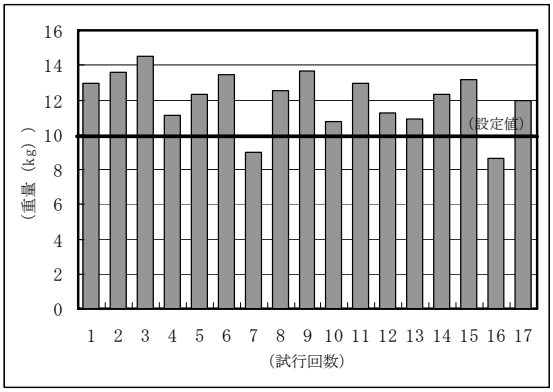
Photo3 State of steel frame(After removed asbestos)

3.2.2　高分子吸収剤による吸水性能

ノズルから高分子吸収剤を同時噴射させることで床面における水溜り等は確認されず，バキューム装置による吸引時においても，水と分離することなく，パサパサの状態で円滑に回収袋まで圧送できることが確認できた。

3.2.3　アスベスト回収システムの重量制御の信頼性

回収装置によってアスベストを 10kg 設定で袋詰めした場合の実際の回収袋重量との差異を図－4 に示す。設定値に対して-1.3kg から+4.5kg の誤差があり，回収装置の滞積防止用の加圧ノッキング時に衝撃で計量器が感知してしまうことに起因しているものと考えられ，加圧時のダンパー調整等の対策が今後必要と考えられる。



図－4　袋詰重量制御の精度

Fig.4 Precision of the weight control

4.　吹付けアスベスト除去工事の作業環境の実状

従来の吹付けアスベスト除去工事では，除去前の湿潤化などによって発塵の軽減が図られるが，発塵は完全には防げない。従って，発塵したアスベスト繊維を作業者や周囲の人々が吸引しないように様々な配慮が求められる。作業者は保護具（防塵マスクや保護衣など）を着用し，ケレン棒等で吹付けを掻き落とす（以下，作業者によるケレン棒除去という)。掻き落とす際に発塵するため，作業場所は床や壁をビニルシートで隔離し，負圧にする。負圧維持のために，新鮮外気の採り入れ量は制限される。このような作業者や周囲の人々が吸引しないための配慮は，除去作業環境を劣悪化する。具体的には作業場内が密閉されて高温化し，気密性の高い保護具を着用した作業者は暑苦しさと息苦しさを感じている。よって作業者による除去作業は非常に生体負荷が高い。

これに対して，除去作業の無人化は作業者の吸引リスクを低減し作業負荷を軽減するが，周囲の人々の吸引リスクを低減するとは限らない。よって，周囲の人々の吸引リスクを，作業者によるケレン棒除去と同等以下にできるような施工性と安全性を備えた無人化システムとすることが重要となる。

5.　吹付けアスベスト除去工事の工程と無人化作業

吹付けアスベスト除去工事の工程概略を表－3 に示す。作業者が保護衣を着用する工程は発塵の可能性がある工程で，負圧集塵装置を稼動する工程は著しい発塵の可能性がある工程である。これらの工程が無人化の対象となる。表中の網掛けをした除去が作業者の負荷が高いために無人化が最も望ましい工程である。

表－3 吹付けアスベスト除去工程の概略

Table3 Removal process of dry-sprayed-asbestos

工程概要		保護具の必要性	負圧集じん機稼動
配置計画	設置位置決定		
1 セキュリティゾーンの作成	清掃、負圧除じん装置設置を含む	要	
2 発じん低減	飛散抑制剤の塗布	要	稼動
3 除去		要	稼動
4 除去された吹付けの廃棄準備	廃棄用袋に回収	要	稼動
5 セキュリティゾーンの撤去	環境測定、清掃を含む	要	

6.　無人化レベルと作業環境

除去作業の無人化には様々なレベルが考えられる。

緊急時等の対応以外には人間が全く関与しない完全無人化と，各工程を人間がロボットを遠隔操作する無人化もある。表－4 に示すように，無人化のレベルによって求められる作業環境は異なる。

表－4　無人化レベルと環境

Table4 Unmanned level and Environment

環境	作業者による ケレン棒除去	無人化	
		ロボットの遠隔操作による無人化	完全無人化
光	経験により低照度でも作業可	カメラとモニタの性能で操作に必要な明るさが決まる	センサによっては照度確保が必要
熱	高温になり、作業環境が悪い	機械部品による温度上限がある	センサによっては温度上限がある
CO_2	監視が必要	不問	不問
粉じん	高濃度では、作業性が著しく低下する	高濃度では監視できない	問題となる場合がある
その他	不問	振動があるとモニタ監視上の問題となることがある	センサによっては音や振動が問題となる

表－4 から，除去作業を無人化としても作業環境の制限がなくなるわけではないことがわかる。また，無人化にはセンシング技術が重要で，センシング技術は作業者によるケレン棒除去より厳しい環境制御が求められる。

そこで，前述の実証試験において，遠隔操作によるロボットでモデルアスベスト（ロックウール）を除去している時の作業環境に関する測定結果について以下に報告する。実証試験施設内には監視カメラを設置し，監視カメラで撮影された画像を別室のモニタで確認しながら，除去ロボットを遠隔操作した。使用した監視カメラの最低被写体照度（白黒モード）は 0.03(lx)と高性能であり，ズームやターンなども遠隔操作できる。また，より鮮明な画像を得るためにカメラの横に照明器具（遠隔制御なし）を設置した。

7.　ロボット遠隔操作除去時の作業環境

7.1　施工性のための環境

7.1.1　通常時の環境

ロボット遠隔操作時の環境に最も影響するのはカメラである（表－5)。除去ロボットはマニピュレータを油圧で制御するため気密性が高く，動作に温湿度や粉塵濃度などは影響しない。照明は防湿形のライトとし，カメラには高温高湿環境から守る為のカバーを取り付ける。さらに，付着した粉塵をワイパーで排除する。しかし，霧の中では撮影できないように，粉塵が舞ってしまうと撮影ができなくなる。

高濃度粉塵を排気せずに除去作業を 20 分も継続すると，目視で確認できるほど粉塵が舞い視界が悪化する。

照度を上げると視界が良くなると考え，実験室中央ので照度を測定した。測定の結果，除去により照度は高くなった（421x→541x）が，見やすさは低くなった。これは，空気中に高濃度で舞った粉塵が光を拡散し，照度が少し上がったと考えられる。見やすさの維持には照明器具を追加するよりも，粉塵濃度を薄める方がよいと判断した。施工性確保にも留意し，複数の排気方法を検討し，高濃度粉塵をノズル直近でスポット排気することにした。

7.1.2　作業員の一時的な入室を考慮した環境

緊急時等においては作業者の一時的な入室が必要となる。保護具によりCO_2への対応が可能である。

除去前にモデルアスベスト面を水で湿潤化（10.2%→21.2%）し高濃度粉塵を吸引することで，粉塵濃度（デジタル粉塵計使用，5000Ｌ空気捕集）は 4.12mg/m^3（質量濃度変換係数 0.00140）まで低減できることがわかった。3.00 mg/m^{3}以上と通常の作業環境としては適切でない高濃度の粉塵環境であるが，作業者は防塵マスクを着用しているので問題はないと判断した。

しかし，高温高湿への対応は難しい。支障ない室温・湿度になるまで入室を遅らせると石綿繊維の漏洩が進んでしまう。そのために，緊急時ではなくても作業者が短時間滞在し，作業のできる程度の室温・湿度でなければならない。室温上昇や高湿化を伴う工法による無人化除去は作業が長時間化し，作業場内はより高温高湿化する。

表－5　無人化（遠隔操作）除去の環境規制

Table5 Environmental regulations of unmanned remote control

		除去マシン	カメラ	ライト	作業者(異常時)
温度に対する耐性		不問	耐高温対応とする	耐高温対応とする	高温不可
湿度に対する耐性		不問	耐高湿対応とする	防湿形で対応	高湿不可
粉じんに対する耐性	非接触	不問	対策必要	不問	防じんマスク対応範囲内のみOK
	接触	付着しない方が良い	付着物を排除する	付着物を排除する	保護衣で対応
二酸化炭素濃度		不問	不問	不問	不問(送気マスクを着用で対応)

実験室の断熱性が不十分で冬季の実験であったため，夏季における除去作業による室温上昇や湿度変化を予測することはできないが，参考値とすべく実測した。

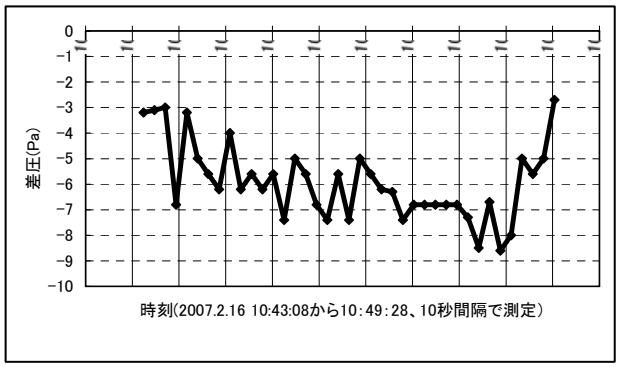
実測の結果，室温上昇は最大 2.6℃/min，冬季（2006.12.7，薄曇）にも関わらず最高室温（室内北側）は 38.4℃に達した。また，最高湿度は 89%（ほぼ同時刻，最も近い場所の気象庁データは 49%）に達した。断熱性の高い作業場では室温 38.4℃以上となると推測される。

従って，何らかの理由で作業員が入室を余儀なくされた場合，通常の室温・湿度の場所から高温高湿の作業場に入る際の作業者への配慮が必要となることがわかった。

7.2　アスベスト繊維漏洩防止

除去作業が無人化であっても，万が一の事故で室内負圧が維持できないことは避けねばならない。通常は床や壁を覆うビニルシートと負圧除塵装置で室内の負圧環境が維持される。どちらか一方でも支障が生じるとアスベスト繊維が漏洩する。使用する負圧除塵装置の選定・管理は無人化システムの有無に関わらないため，今回の実証試験においては床や壁を覆うビニルシートを検討した。

本システムの除去ロボットは自走するため，自走時に床のビニルシートを破損する懸念があった。そこで，通常，床は厚さ 0.15ｍｍのビニルシートを二重にするところを上側の１枚を厚さ 1ｍｍに変更したことにより，ビニルシートは破損せず，室内の負圧が維持されることを差圧計測で確認した（図－5)。



図－5　負圧維持確認用差圧計測結果

Fig.5 Measurement result of differential pressure

8.　まとめ

今回，ロックウールを使用した実験室レベルでのアスベスト無人化除去・回収システムの実証試験を行い，これまでの作業者の手作業に替わり，遠隔操作によるロボットによって安全に効率良くアスベストを除去・回収できることが確認できた。

また，乾式系吹付けアスベストを無人化（遠隔操作）除去する場合の環境側面を検討し，①ノズル直近でスポット排気することで粉塵濃度を一定以下に保つことと，②自走式のロボットを使う場合には床養生シートが破損しないように配慮し，差圧維持を確認せねばならないこと，③無人化であっても緊急時における作業員の一時的入室を想定した高温高湿化対策が必要であることもわかった。

今後は実アスベスト除去現場での実証テストを行い，更なる技術的課題を解決した上で早期実用化を目指す。

【本研究開発は，平成１８年度独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構委託事業「緊急アスベスト削減実用化基盤技術開発（吹付けアスベスト無人化除去・回収工法の実用化に関する研究開発)」による】

謝辞

本研究開発を進めるにあたり，多大なる御指導を賜りました，独立行政法人　建築研究所　材料研究グループ長・建築生産研究グループ長の本橋　健司様，財団法人　ベターリビング　筑波建築試験センター　環境・防耐火試験部長の遊佐秀逸様，ニチアス株式会社　建材事業本部の常谷　雅彦様に深く感謝致します。

参考文献

1）森直樹,長瀬公一,大山能永,村田勤,″乾式系吹付けアスベストの無人化除去・回収システムの開発（その1）システム概要，及び実証試験結果”日本建築学会大会学術講演梗概集，2007年8月

2）大山能永,森直樹,長瀬公一,村田勤,″乾式系吹付けアスベストの無人化除去・回収システムの開発（その2）作業環境の検討”日本建築学会大会学術講演梗概集，2007年8月