

壁面塗装用ダストレス 塗装機の開発

Remote-controlled Dustless Painting System
for Large Structure



CM 研究所
第1研究部
市川 昭人
Akito
Ichikawa



CM 研究所
第1研究部
竹内 徹
Tohru
Takeuchi



CM 研究所
檜原 篤尚
Atsunao
Hiwara

1. はじめに

備蓄タンクやガスホルダー等の大型構造物や鉄道、高速道路等の鋼橋梁あるいは大型船舶の内外板といった屋外塗装現場では、高所作業の危険性、熟練工の減少、足場工程のコスト負担など様々な問題を抱えている。その対策として、大手橋梁管理会社をはじめ多くの設備メーカーが人間の作業負担を軽減するべく塗替え塗装の自動化を検討してきた。

このような取り組みは塗替えにおける旧塗膜の剥離工程で先行しており、プラスト機能を有したロボット¹⁾や塗膜の膜厚や劣化状態を測定する機能を有したロボット^{2), 3)}など、磁力や吸引力を用いて壁面を自走するロボットが既に具現化されている。一方、塗装に関しては各種の提案⁴⁾がされているものの、実用面での課題が多く工業的に展開できていない。このことは、塗膜剥離工程で足場を低減できたとしても塗装工程で足場構築が必要となり、塗替えシステム全体としては何ら負担低減に繋がらないことを意味している。このような背景からも、塗装工程の自動化・省力化は、塗装業者のみならず、大型建造物に関わるあらゆる業者から切望されていると言えよう。

さて、被塗物が大型建造物の場合、その立地は市街地や自然環境豊かな郊外が多い。このような条件下で、塗替え時に最も注意すべきポイントは周囲に対する塗料飛沫である。従って、飛沫の極力生じない塗装方法が用いられており、特にローラー塗装方式が主流を占めている。それゆえ、移動ロボットを使った自動塗装システムでもローラーを適用した事例が多い^{5), 6)}。しかし、自動塗装の場合、段差での塗り込みやならし、仕上げなどの職人並みの細かい作業ができず、塗り残しや仕上げ不良になりやすい。特に、高所で防錆用塗料の塗り込みが不十分だった場合、その補修クレームは本システムの信頼性を揺るがすものとなる。そこで我々は、ある程度の付きまわりが期待できるスプレー塗装方式を採用した。

スプレー塗装方式は塗料を一旦微粒化させるために形成する塗膜の仕上りは良好であるが、塗粒が飛散し易く前述の飛沫量の問題には不利である。そこで、微粒化条件を

最適化し、従来のスプレー塗装方式では出来なかった飛沫（ダスト）レスと仕上りの両立を達成した。

本稿では、壁面移動用のロボット³⁾やゴンドラに搭載可能な小型で軽量な自動塗装機の開発について紹介する。

2. 開発目標と技術ポイント

2.1 開発目標

塗料飛散のないローラー塗装方式では塗り残しや仕上り不良の問題があり、従来のスプレー塗装方式は塗料飛沫の問題がある。また、壁面走行と同時に塗装していく方法は、走行により生じる振動や段差での移動速度変化で塗装品質が悪化するという問題が生じる。さらに、高所での塗装を行う場合、ポンプや塗料を配置する広い足場やゴンドラが必要となり、スペースを確保しやすい地上から塗料を送液するためには、長い塗料ホースや高出力のポンプが必要となる。

そこで、上記の問題点を解消するため、①従来の仕上りを維持したまま塗料飛散を最小限にする塗装ヘッド、②壁面移動ロボットへ搭載可能でタクト塗装を可能にするレシプロ装置、③地上からの塗料送液を解消するカートリッジ方式の塗料供給装置等が組み込まれた自動塗装機の開発を目標にした。

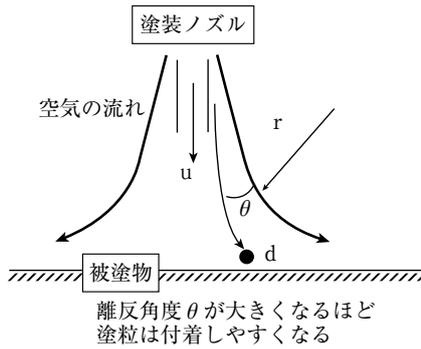
また、基本的な塗装スピードは従来の人手作業と同等の20 m²/hを基準にした。以下個々の技術ポイントについて説明する。

2.2 技術ポイント

2.2.1 ダストレスと仕上りの両立

以前に開発した近接・適正霧化スプレーシステム⁷⁾を採用し、塗料の飛散量を最小限にするスプレー塗装ヘッドを設計した。

霧化空気の流れと塗着のメカニズムについての理論式を図1に示す⁸⁾。本図は塗装ノズルから被塗物へ放出した空気と塗粒の流れを表し、太い実線が空気の流れ、細い実線が塗粒の動きを示している。空気の流れと塗粒間の離反角度を θ とすると、 θ が大きいほど塗粒が空気流れから外



$$\tan \theta = \frac{d^2 \times (1 - \rho_p / \rho_f) \times u}{18 \times v_f \times r}$$

- θ : 空気流れと塗粒間の離反角度
- u : 空気の流れ速度
- ρ_p : 塗粒の密度
- ρ_f : 空気の流れ速度
- v_f : 空気の流れ速度
- d : 塗粒の直径
- r : 空気の流れの曲率半径

図1 霧化空気の流れと塗着メカニズム⁸⁾

れ塗着しやすくなる。式によれば、塗粒の直径と空気の流れ速度が大きく、空気の流れの曲率半径が小さいほど塗粒が塗着しやすい。上述の近接塗装はノズルと被塗物の距離を近く保つ方式で、空気抵抗による塗粒の失速が抑えられるために、塗料の飛散量の低減が期待できる。

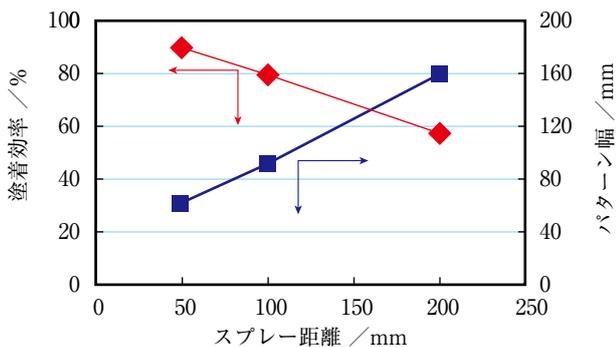


図2 スプレー距離と塗着効率

予備的に検討したスプレー距離と塗着効率、パターン幅の関係を図2に示す。一般的な下塗上塗兼用塗料をエアースプレーガン（アネスト岩田社製ワイダー 200 G、霧化圧力 0.2 MPa）を用いて塗装した。スプレー距離を近づけることで塗着効率が上がり、塗粒の飛散が抑えられることが分かった。しかし、これに伴いパターン幅は狭くなり塗装

処理面積が低下した。そこで、塗装ノズルを複数本並列し、各パターン幅の重なりと液分配を適正化したマルチノズルヘッドを設計した。本稿では、目標とした 20 m²/h（壁面移動ロボットによるタクト移動時間は含まず）の塗装スピードを確保するため、4本並べて配置した(写真1)。エポキシ樹脂ジンクリッチペイント「SD ジンク 500」の場合、スプレー距離 50 mm、1ノズルあたり塗料吐出量を 40 ml/min、霧化エア量 20~40 ℓ/min とすることで、有効パターン幅約 40 mm を確保した。

更なるダストレスを目指し、近接塗装以外にも微粒化度を最適化した。図1の理論式によると、塗粒の直進性(=tan θ)は塗粒直径の2乗に比例しその影響は非常に大きい。しかし、単に粒径を大きくすれば形成膜の平滑性は劣ることに繋がり、適正な微粒化調整が必要となる。そこで、塗料の粘性やウエット膜厚など前提条件の異なる実験を繰り返し、ダストレスと平滑性を霧化エア量から調整する知見を蓄積した。微粒化の状態観察として、エポキシ樹脂ジンクリッチペイント「SD ジンク 500」の塗装状態を高速画像撮影（シャッター速度 1/2000 秒）した写真を示す(写真2、3)。これら写真から霧化エア量と微粒化度が判断でき、写真2の条件では塗膜の平滑性は劣るが塗着効率が高く、一方、写真3の条件では平滑性良好であるが塗着効率が低くなる(図3)。

2.2.2 タクト塗装方式と小型軽量レシプロ機構

提案されている各種の自動塗装システムは、作業効率を考慮して壁面走行と同時に塗装していく方法が多い。この場合、走行により生じる振動や段差での移動速度変化で塗装品質が悪化するという問題が生じる。そのため、本稿では塗装機を塗装開始位置まで移動させる工程と塗装アームにより一定領域を塗装する工程に切り分けた。本方式をタクト塗装方式と称す(図4)。この方法によれば、塗装中は

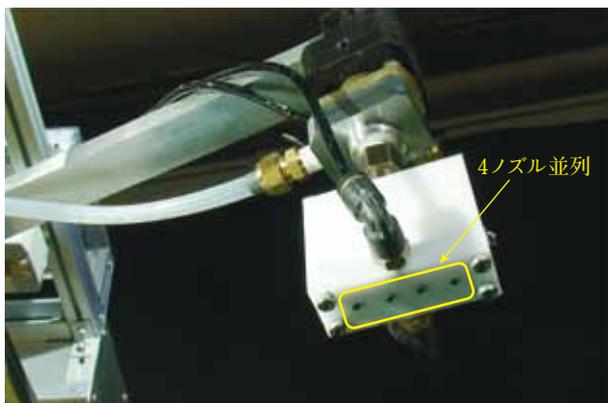


写真1 4ノズル並列ヘッド



写真2 「SDジンク500」
霧化エア20 ℓ/min
塗料吐出量40 ml/min



写真3 「SDジンク500」
霧化エア40 ℓ/min
塗料吐出量40 ml/min

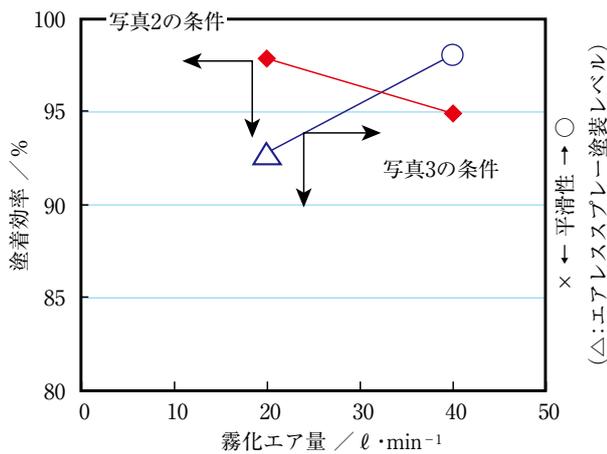


図3 霧化エア量と塗着効率及び塗膜の平滑性との関連

壁面移動ロボットが停止しているため移動振動によって塗装品質が悪化することを防止できる。

しかし、この方法では一定面積の塗装にアーム等の積載用具が巨大化する懸念があるため、小型軽量レシプロ機能を採用した。

一定領域の塗装を機械で行う場合、直線上に移動するロボット2台を垂直に設置する方法が一般的だが、このような仕様では塗装部の重量や張り出し面積が大きく壁面移動ロボットの搭載負荷も多大である。

そこで、円運動を直線運動に変換するコンコイダル近似平行レシプロ機構を考案し塗装部の軽量化を図った。コンコイダル近似平行運動について述べる(図5)。点1を支点とするクランク1、2と点3で回るスライド4、ピン2でクランクと接続されているロッド5で構成される。クランク1、2を動かす事で、ロッド5が回転と同時に滑り、点6は近似平行を描く運動である。

直線移動用ロボットを壁面移動方向と垂直に設置し、ロボット稼動部に回転運動ロボットを設置した。回転運動ロボットはコンコイダル平行運動で変換した直線運動を壁面

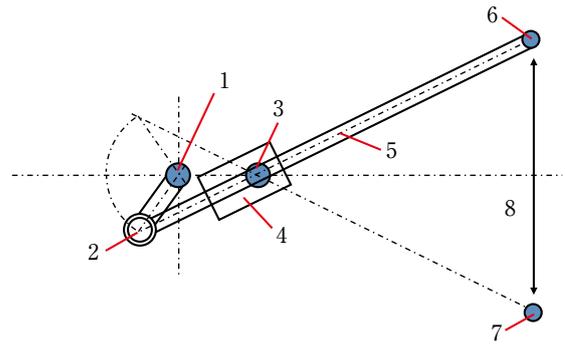


図5 コンコイダル近似平行運動

移動方向と水平に配置した。直線運動を行うロボットと回転運動を行うロボットと交互に動かすことで大きな一定領域の塗装が可能となる(図6)。

直線運動を行うロボットに比べ、回転運動を行うロボットはコンコイダル近似平行運動を行う支点等の機構を含めても軽量かつ小型で作業員2人でも充分取り扱うことが可能である。そのため、壁面移動ロボットやゴンドラへの搭載も容易である(図7、8)。

また、回転運動の速度を上げ塗装ノズルを増したことで1回のタクト面積 0.25 m²(縦横 500 mm) を約 45 秒で塗装することを可能とし、20 m²/h(壁面移動速度を含まず。計算値)を達成した。壁面移動ロボットの移動速度を加味しても充分な作業効率が得られる。

2.2.3 全姿勢対応カートリッジ式塗料供給方式

高所へ塗料を送るためには、長い塗料ホースと高出力のポンプが必要であり、長いホースが未硬化塗膜に接し塗膜欠陥を生じる事がないよう配慮がいる。作業場所近くにポンプを配置する場合、足場やゴンドラを設置し充分な作業スペースを確保する必要がある。また、天井方向への塗装も視野に入れた場合、全姿勢(360°回転)に対し塗装できる事が望ましい。

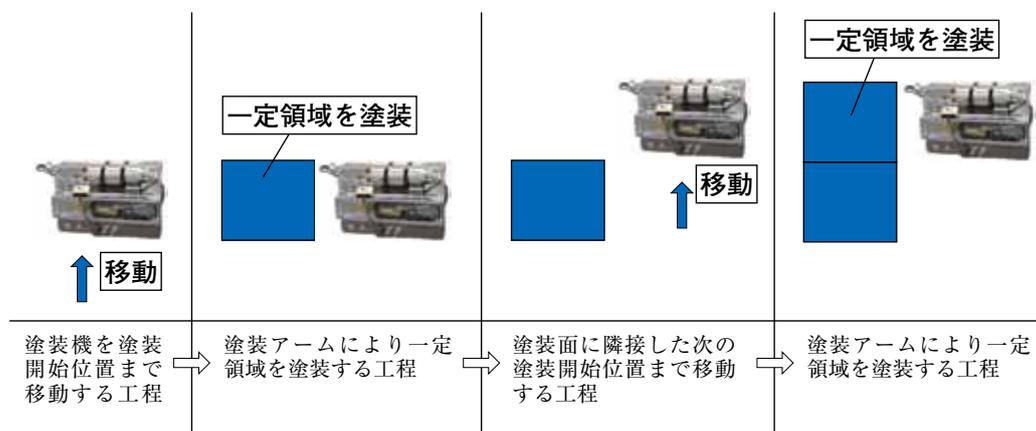


図4 タクト塗装方式

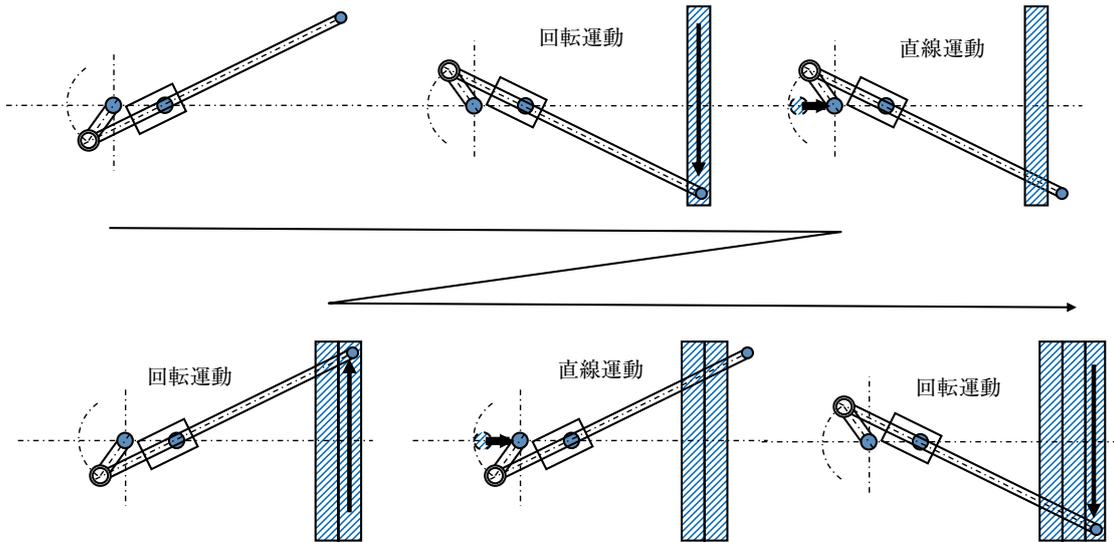


図6 直線運動、回転運動による塗装方法

そこで、カートリッジ式塗料供給方式を採用した。加圧タンク内に塗料チューブを収納し、圧縮空気的作用により塗料チューブを収縮させて塗料を供給する事とした(写真4)。これにより、自走する塗装機への搭載が可能で送液途中で気泡が塗料に混入することなく全姿勢での送液が可能となる。

塗装機とタンクの接続はワンタッチ式のコネクターにしカートリッジタンクの着脱を容易にした。そのため、大面積の塗装を行う場合、塗料を充填したカートリッジタンクを複数用意することで対応可能である。

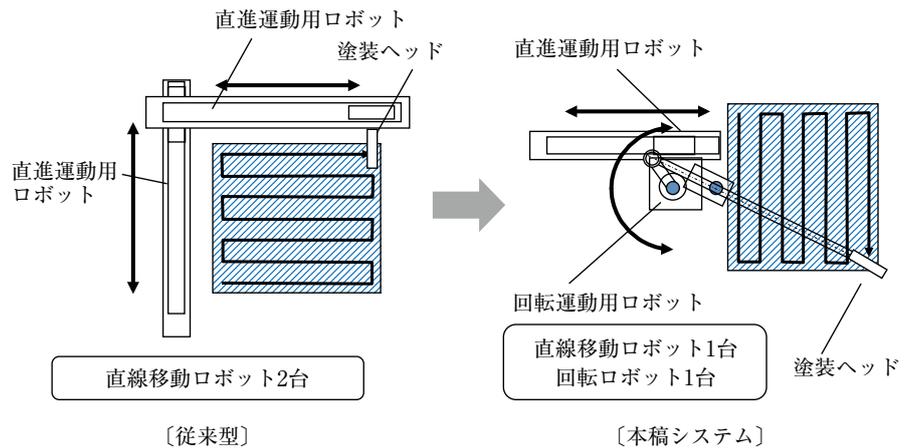


図7 従来型ロボットとの比較

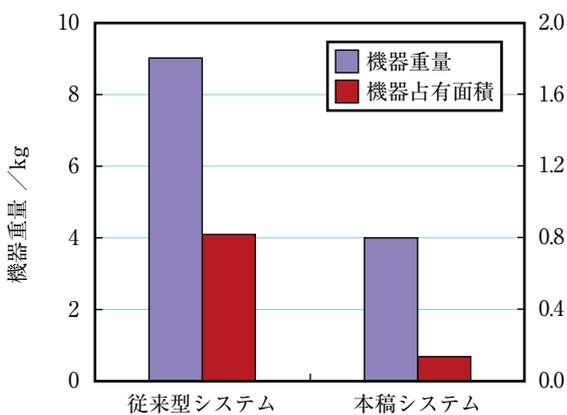


図8 従来型システムとの比較



写真4 全姿勢対応カートリッジ式塗料供給方式

3. 装置仕様と性能

塗装機サイズは壁に向かった時に横 700 mm 高さ 440 mm 奥行き 230 mm で重量は 15 kg。約 3 ℓ 入るチューブ型圧送塗料供給システムを全て塗料で満たしても作業員 2 人で充分に取扱が可能で、ゴンドラ等にも容易に搭載可能な大きさにした。奥行きも薄くし重心を塗装する面に近づけ、壁面走行ロボットへの搭載に配慮した (図9)。

エポキシ樹脂ジンクリッチペイント「SD ジンク 500」を用いた場合、1回のタクト面積 0.25 m² (縦横 500 mm) を約 45 秒で塗装することを可能とし 20 m²/h (壁面移動速度を含めない。計算値) を達成した。目標乾燥膜厚 75 μm の設定で塗装した結果、塗着効率 95 % 以上でスプレーダストは目視では全く見られず、装置への塗料飛沫付着も無かった。また、仕上り外観はエアレススプレー塗装と同様の仕上りとなった (表 1、表 2)。

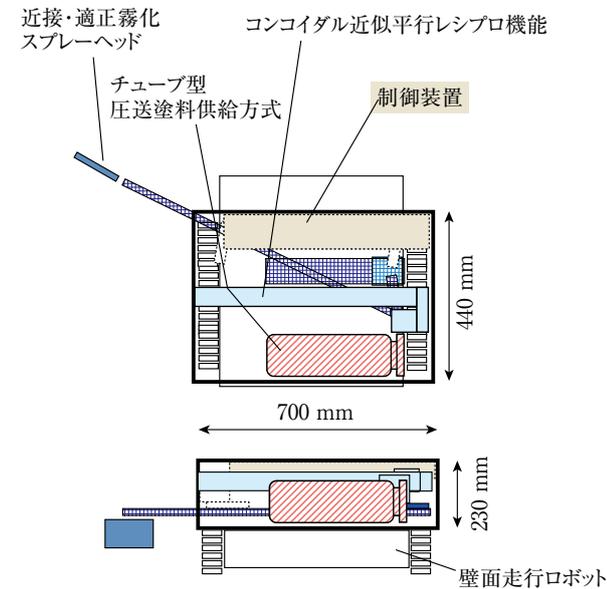


図9 壁面走行ロボットに搭載した壁面塗装用ダストレス塗装機の構成

表1 壁面塗装用ダストレス塗装機仕様

塗装ユニットサイズ	700×440×230 mm
塗装ユニット重量	15 kg (塗料未搭載)
塗装ノズル	2 mm φ 単径4連/外部エア混合式
1タクトあたりの塗装面積	500×500 mm
塗装処理速度	20 m ² /h
1バッチあたりの塗料積載量	3 ℓ

4. まとめ

壁面移動ロボットに搭載可能な小型・軽量の自動塗装機を開発した。本塗装機は近接・適正霧化スプレーヘッド、タクト塗装方式、コンコイダル近似平行レシプロ機構やチューブ型圧送塗料供給方式を用い、小型かつ軽量で壁面移動ロボットやゴンドラにも搭載が可能である。そのため、人による高所作業の低減が可能で、安全性が向上する塗装工程が得られ足場工程の低減も可能となる。写真5は壁面移動ロボット (ダイヤ電子応用株式会社製DHクローラー) に搭載した自動塗装機の壁面塗装実験の様子である。

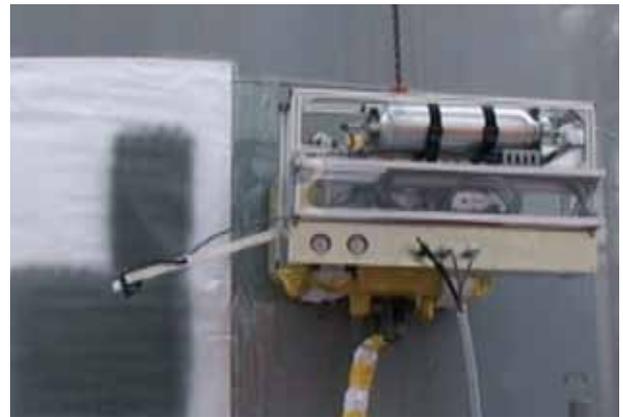


写真5 壁面走行ロボット³⁾に搭載した壁面塗装用ダストレス塗装機

5. おわりに

様々な要素システムを組合せることで、小型・軽量の自動塗装機を開発できた。壁面移動ロボットも進出し実用化が進んできている。高所作業の危険性や熟練工の減少、足場削減による工期短縮などにより、壁面塗装の自動化の要望は増えると思われる、今後も自動塗装機の開発を図ってきたい。

表2 「SDジンク500」塗装結果例

塗着効率	95 % 以上
ダスト	目視上ほぼなし
乾燥塗装膜厚	75 μm 膜厚分布 ±10 % 以内
仕上り外観	エアレススプレー塗装同等

塗装条件

スプレー距離50 mm、塗料吐出量40 mℓ/min (1ノズル)
霧化エア量25 ℓ/min (1ノズル)、ピッチ20 mm
スプレー移動速度370 mm/s

参考文献

- 1) “サープラストによる塗膜剥離システム” 東京ガスエンジニアリング株式会社ホームページ、http://www.netdecheck.com/emerging_technologies/waterblast/page1.htm (参照 2011/06/06)
- 2) 建部昌幸：ロボット、[193]、17-21 (2010)
- 3) “壁面自走式ロボット DHクローラー” ダイア電子応用株式会社ホームページ、<http://www.dia-elec.com/item/gp02.html#03> (参照 2011/06/06)
- 4) “長大橋の維持管理設備” 本州四国連絡高速道路ホームページ、<http://www.jb-honshi.co.jp/technology/maintenances.html> (参照 2011/06/06)
- 5) “開発実績紹介 (橋梁維持作業機械)” 株式会社 技術開発研究所ホームページ、http://www.rdi-japan.com/record/record_3.html (参照 2011/06/06)
- 6) 香川晃、河野正樹：建設ロボットシンポジウム論文集、10th、379-386 (2004)
- 7) 大本宗治、田中孝司、竹内徹：塗料の研究、**133**、30-34 (1999)
- 8) 竹下直孝：塗装技術、**34** [437]、141-146 (1995)