

鋼橋りょう塗装システムの開発

Development of a Spray Coating System for Box-Girder Bridges



CM研究所
(現SD研究所)
市川昭人
Akito
Ichikawa



CM研究所
第1研究部
中岡豊人
Toyoto
Nakaoka



CM研究所
第1研究部
竹内 徹
Tohru
Takeuchi

1. はじめに

備蓄タンクやガスホルダー、鉄塔や鋼橋りょうなど大型構造物の塗替え作業現場では、高所、寒暖、強風、狭い足場といった劣悪な作業環境問題や、熟練工の減少など様々な問題を抱えている。塗装の自動化はこれらの問題を解決し、更に膜厚の安定化に伴う塗膜品質の安定や塗装速度の高速化による工期短縮、コスト削減なども期待される手法である。

多くの鉄道鋼橋りょうは塗替えの時期を迎えているが、広い作業足場の確保が困難な山岳地帯など全国各地に設置され、構造も多種多様なため、未だ職人による刷毛、ローラーを用いた塗替え作業が行われている。

大手高速道路橋りょう管理会社で使用している自動塗装機¹⁾は周辺環境、作業環境への配慮から塗料飛散の少ないローラー塗装方法を採用しているが、塗装面凹凸(5 mm 高さ程度)への追従が困難な接触式塗装方法のため、添接部(ボルト列)などが多く存在する鉄道鋼橋りょうへの転用は難しい。そこで、鉄道鋼橋りょうを対象とし非接触塗装であるスプレー塗装方法を用いた塗料飛散の少ない塗装システムを東日本旅客鉄道株式会社と共同開発し、実際の鋼橋りょうを模した箱桁の自動塗装検討を行ったので報告する。

2. 開発目標

今回は平面部が広く、機械化の効果を発揮しやすい箱桁構造の橋りょうを対象とした塗装システムの開発を行った。鉄道鋼橋りょう塗装塗替え工程は、素地調整後、厚膜型変性エポキシ系塗料「エスコNB」(膜厚60 μm)を3回計3層塗装し、厚膜型ポリウレタン系塗料「レタン6000HB」(膜厚50 μm)を1回1層塗装する計4回塗装(計230 μm)を行うT-7仕様を採用した。本システムの開発目標は、「環境配慮」「コストメリット」「作業性向上」「施工品質」の面から、①塗料飛散が少ない、②施工効率(塗装面積 / 機械稼働時間)1時間当たり

50 m²以上、③作業員3人以下、④足場内で作業可能なサイズ、⑤刷毛塗装同等以上の施工品質の確保を狙うこととした。

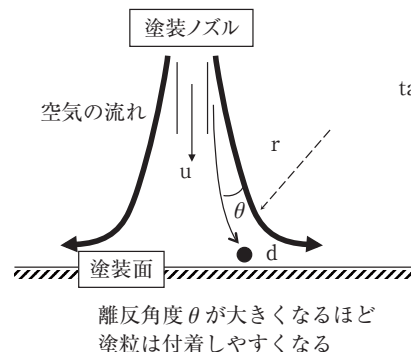
3. 技術ポイント

本開発での技術ポイントを高所、狭小、閉鎖的な作業足場内で塗装作業を行うため、①塗料の飛散を抑えた塗装ガンの開発、②小型軽量なシステムの開発、③補強材や添接部など凹凸面に対して塗装ガンの移動が容易なシステムの開発の3点とした。

3.1 塗装ガンの開発

3.1.1 飛散低減と仕上がりの両立

スプレー塗装は一般的に塗料飛散が多いため、本開発では弊社で実績があり飛散低減可能な「近接・適正霧化スプレーシステム」^{2)、3)}を採用した。これは2重円筒による外部混合2流体ノズルを用い塗着困難な小さな塗料粒子(以下、塗粒と略す)の発生を抑え、塗粒速度を速く、塗粒を塗装面に対し垂直に衝突させることで塗料飛散を抑える方法である。霧化エアの流れと塗着のメカニズムおよび理論式を図1に示す⁴⁾。本図は塗装ノズルから塗装面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 が大きいくほど塗粒が空気の流れから外れ塗着し

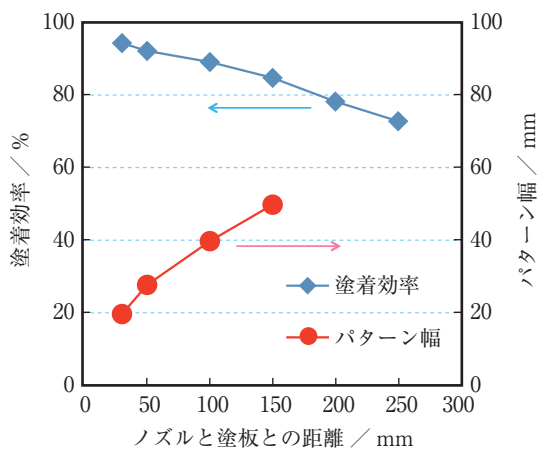


$$\tan \theta = \frac{d^2 \times (1 - \rho_p / \rho_f) \times u}{18 \times \nu_f \times r}$$

- 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 : 空気密度
- ν_f : 空気動粘度
- d : 塗粒の直径
- r : 空気の流れの曲率半径

図1 霧化エアの流れと塗着メカニズム

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。ただし、大き過ぎる塗粒は仕上がりを悪化させるため適正な大きさに制御し、塗粒の空気抵抗による減速を避けるため塗装ガンと塗装面までを適正な距離にする必要がある。図2に塗装距離を変動させたときの塗着効率とパターン幅を表すグラフを示す。塗装距離が近づくほど塗着効率は上昇するものの、塗粒を塗面に対し垂直に当てる構造のため、パターン幅は極端に狭くなることわかる。塗着効率と施工効率の観点から塗装距離を50 mmとし、塗料吐出口内径や霧化エア流路クリアランスなどを適正化(図3)したノズルを作成することとした。次項から、この適正化手順について述べる。



塗料吐出口内径：φ0.92 mm
 塗料：厚膜型変性エポキシ系塗料「エスコNB」
 塗料吐出量：50 g / min
 霧化エアクリアランス：0.2 mm
 霧化エア量：16 ℓ / min

図2 塗装距離と塗着効率、パターン幅

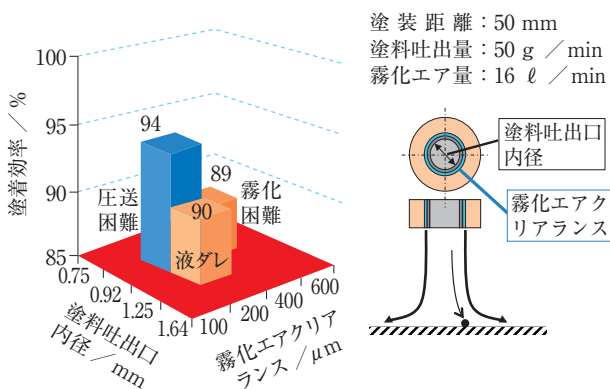


図3 ノズル形状適正化

3.1.2 パターン幅の適正化

駆動装置の軽量化、強度の面から塗装ガン移動速度は300 mm/sが最大であり、目標施工効率50 m²/hを達成するためには塗装パターン幅を100 mm以上確保し、且つ最小限の塗り重ねで塗装する必要があった。そこで台形状の塗装パターンを用い、1コートで規定膜厚を達成する方法を

考えた(図4)。次にこの塗装パターンを得る手法について説明する。図5に示すようにノズル単体でのパターン幅は20~30 mmと狭いため、ノズルを並べて塗装パターン幅の確保を狙った。台形状のパターン形状は塗装パターンシミュレーションの結果から、16本のノズルを7 mm間隔で並べることで成立することを確認した(図6)。このシミュレーション結果を具現化するためには全てのノズルから同量の塗料を吐出しなければならない。装置軽量化のため機械を使用した分液は困難なため、ガン内部構造で分液する必要があった。そこで、1本のホースから送られてきた塗料を、塗装ガン内部で2分割し、それを繰り返す方法を採用した(図7)。この方法は全ノズル部の圧力損失が同一になり流量変化、塗料粘度変化に影響されにくい。またノズル数選定理由は、2⁴以上で必要パターン幅、設定膜厚を得られるためである。

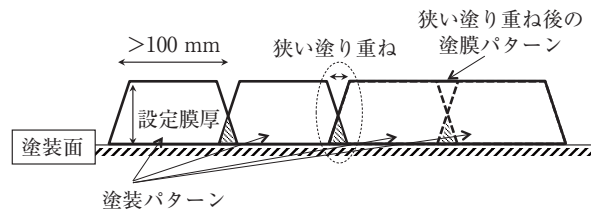


図4 塗り重ねイメージ

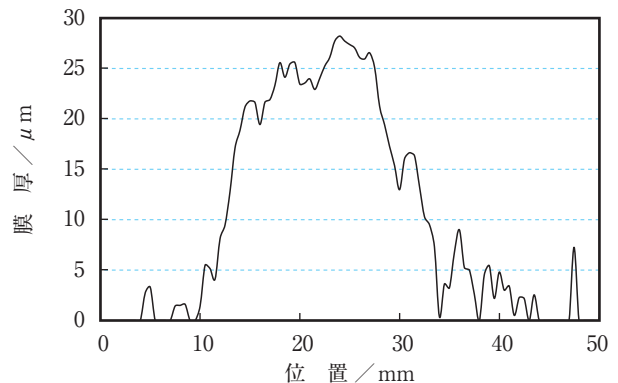


図5 ノズル膜厚分布

16ノズル 7mm間隔 並列の場合

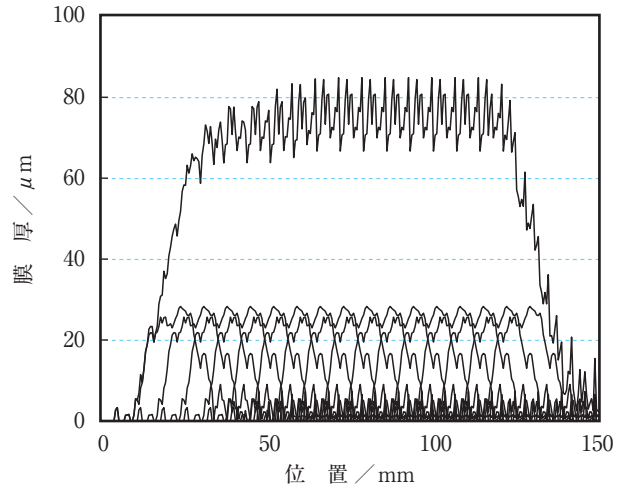


図6 塗装パターンシミュレーション結果

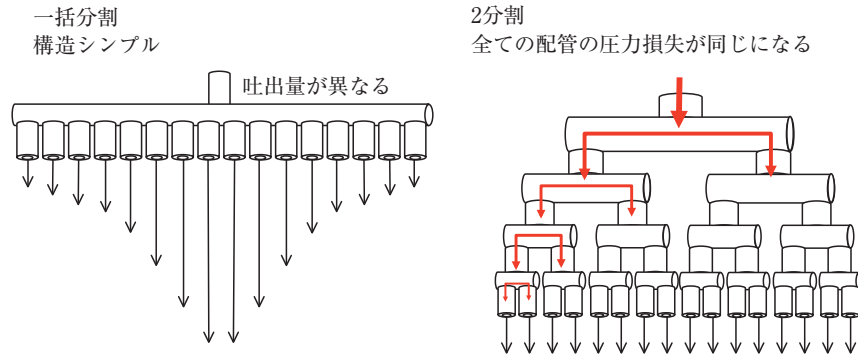


図7 分液方法

更に各ノズルの吐出量誤差をより小さくするため、各ノズル先端の圧力損失を調整した。圧力損失が小さい場合精度の高い分液が出来ず、高い場合送液が困難となる。圧力損失を適正な範囲 (0.004 ~ 0.01 MPa) に設定することで吐出量誤差を15%以下に抑えることが出来た(図8)。

16本のノズルは各ノズル間での霧化エアによる干渉を抑えるため千鳥状に配置し各ノズル間の距離を確保した(図9)。図10に設計した塗装ガンの

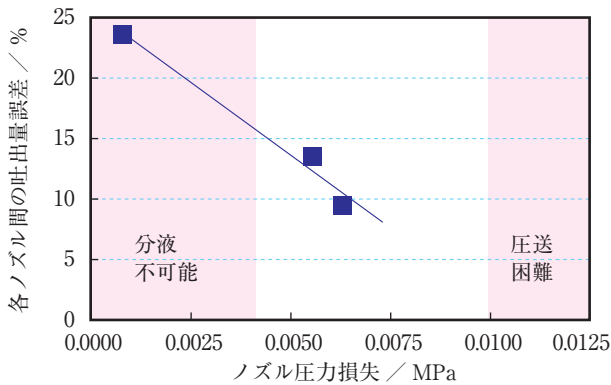


図8 ノズル先端部の圧力損失調整

の膜厚分布とシミュレーションの膜厚分布を比較した結果を示す。設計通りのパターン幅と膜厚分布であることを確認した。

3.1.3 霧化エア量の適正化

設計した塗装ガンを用い、目標施工効率と設定膜厚を確保する吐出量で霧化エア量の最適化を行った。各塗料にて最適化を行ったが、代表して厚膜型変性エポキシ系塗料「エスコNB」を吐出量 440 g/min で塗装した時の霧化エア量と塗着効率の関係を図11に示す。塗着効率は霧化エア量減少と共に向上するが、120 ℓ/min 以下になると低下する。これは塗粒の大きさ、塗粒速度の影響と考える。また、塗装状態として、少ない霧化エア量では連続膜を形成出来ず未塗装部分が発生し、多い霧化エア量の場合は塗料飛散が多くなる。そこで、塗着効率が高く、成膜可能な霧化エア量を選定 (160 ~ 200 ℓ/min) した。

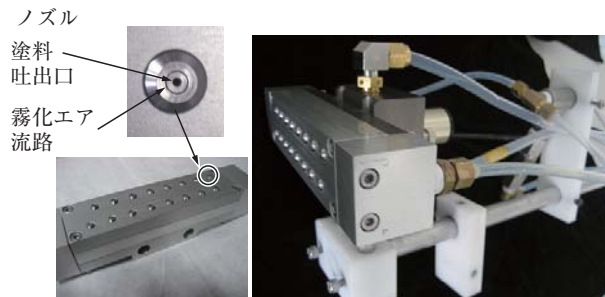
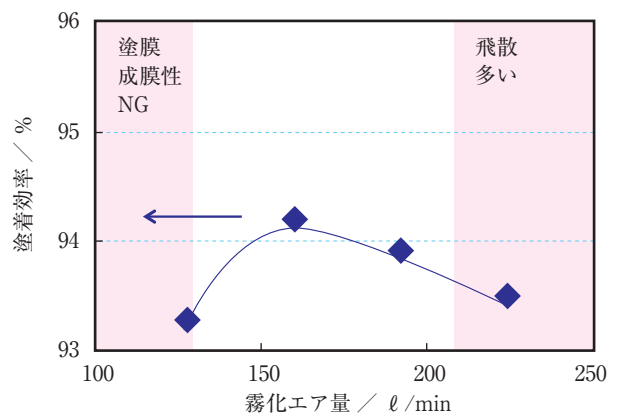


図9 塗装ガン



塗料：厚膜型変性エポキシ系塗料「エスコNB」
塗料吐出量：440 g/min
塗装ガン移動速度：300 mm/s
塗装距離：50 mm

図11 霧化エア量と塗着効率

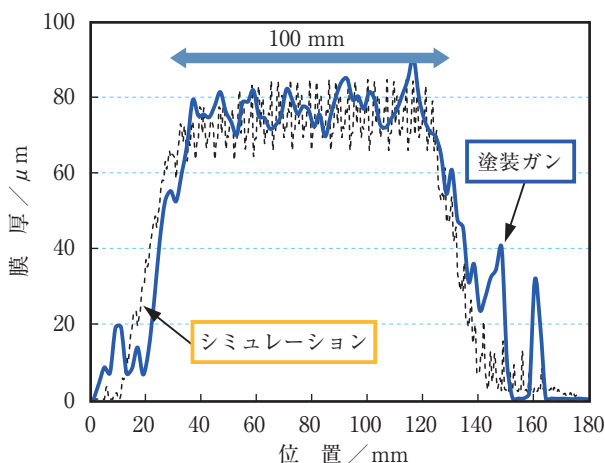


図10 塗装パターン膜厚分布

3.2 塗料供給ユニットの開発

軽量、コンパクト化を狙い、送液装置や制御盤を一体化した塗料供給ユニットを設計した。ダイヤフラムポンプを選定するなど構成部品を厳選し重量を 30 kg 以内におさえ、作業者 2 人での持運びを可能とした、外寸 W900 mm×D235 mm

×H980 mmと奥行きを薄くすることで足場内の人の移動も容易にした。

3.3 塗装ガン移動システムの開発

本検討では磁石や吸着を用いた壁面移動ロボット^{5),6)}と比べ、障害物の乗越えが容易な仮設レール方式を考案し開発を進めた。仮設レール設置イメージを図12に示す。仮設レールは磁石や吸着パッドで容易に着脱可能な仕組みにした。この方式のメリットは塗装を終了した部分の仮設レールを取外し、未塗装部分の仮設レールに継ぎ足し取付けることで、連続的な塗装が可能となることである。塗装ガンの軌跡を図13に示す。塗装ガンの垂直軸移動と仮設レールによる垂直軸の移動を交互に繰返し、矩形形状に塗装ガンを移動させる。仮設レールによる移動時は塗装停止することで塗装面全体が均一な膜厚が得られる。

補強材部の移動の様子を図14に示す。塗装ガンを塗装面から離すことで、容易に補強材等の障害物を乗越えることが出来る。

4. 屋外箱桁による性能確認試験

4.1 屋外試験概要

側面高さ2.5 m、下面2.5 mの屋外箱桁モデル(図15)側面に開発した仮設レール方式の塗装システムを設置した状況について図16に示す。各塗料種で適正化した表1に示す塗装条件で検討を行った。評価項目としては職人による刷毛塗装と本塗装システムとによる施工品質、本塗装システム側面及び下面塗装での塗着効率、施工効率とした。

4.2 屋外試験結果

刷毛塗装と本塗装システムの施工品質の比較は都合により、厚膜型変性エポキシ系塗料2層(膜厚60 μm×2回120 μm)、厚膜型ポリウレタン系塗料1層(膜厚50 μm)合計目標膜厚170 μmの3層塗装工程にて実施した。実験結果を図17に示す。刷毛塗装は平均膜厚276 μm、標準偏差30.8に対し、本塗装システムは平均膜厚177 μm、標準偏差9.2であった。塗装膜厚のばらつきは刷毛塗装と比べ、本塗装システムのほうが小さく均一な塗膜が得られていることが分かる。付着強度は両塗装方法で基準2.0 MPaを十分に上回っていた。刷毛目が発生し易い刷毛塗装と比べ、本塗装システムは平滑な仕上がり膜を得ることが出来た。

箱桁モデル側面、下面を塗装した結果を表2に示す。本塗装システムの屋外での塗着効率は約90%あり、極めて塗料飛散が少ないことがわかった。目視による塗装ダストも少なく設定膜厚を確保できた。施工効率は桁側面、下面とも90 m²/h程度と高い値となった。なお、塗着効率は塗装膜厚と実際の塗料使用量から算出し、施工効率はシステム稼動時間当たりの塗装面積とした。

下面塗装の様子及び塗装後の塗膜状態を図18、19に示す。地面から下面までの距離は70 cmと狭く下面にもぐっ

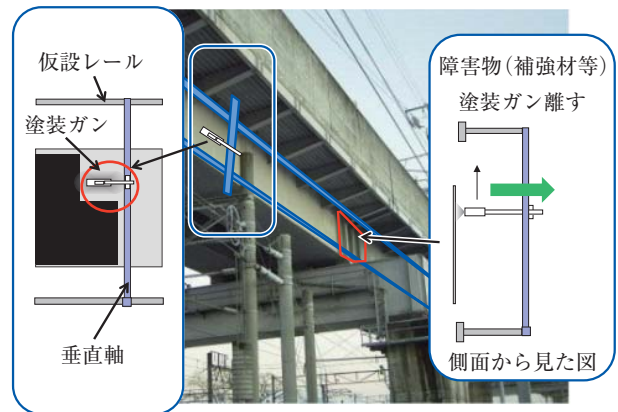


図12 仮設レール設置イメージ

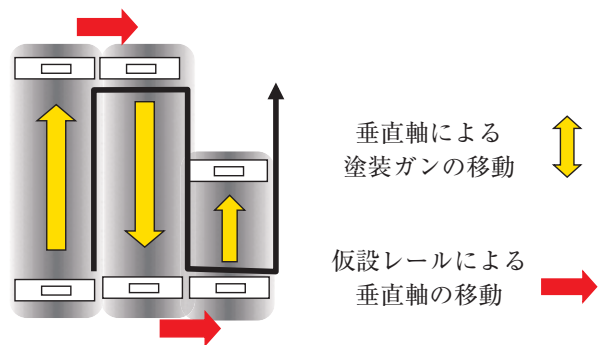


図13 塗装ガン移動軌跡

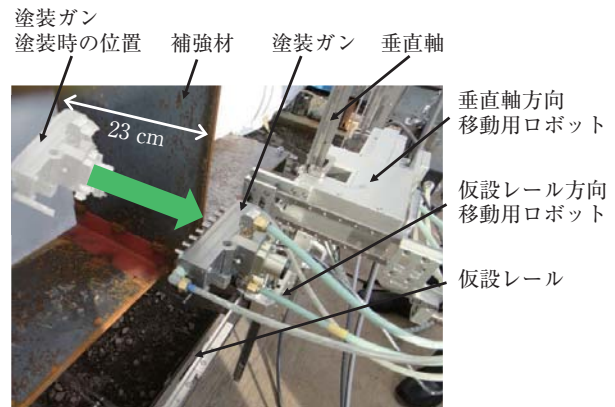


図14 補強材部の移動の様子

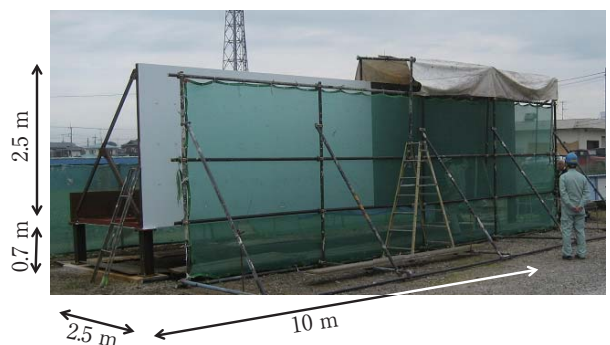


図15 屋外箱桁モデル

ての人力による塗装作業は高い技術を要する。側面、下面の塗装結果が同等であることから、塗装技術の必要な下面への塗装に十分有効な手段であることが分かる。

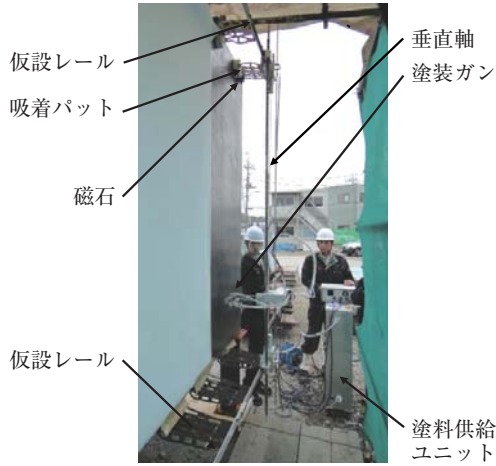


図16 塗装システム設置状況

表1 塗装システム基準塗装条件

塗料種	塗料名	希釈率	吐出量	霧化エア量
厚膜型変性エポキシ系塗料	エスコNB	10%	440 g/min	160 ℓ/min
厚膜型ポリウレタン系塗料	レタン6000HB	5%	400 g/min	140 ℓ/min

塗装ガン移動速度:300 mm/min ガン距離:50 mm

表2 塗装システムによる塗装結果

塗料種	塗料名	塗装面	膜厚	塗着効率	施工効率
厚膜型変性エポキシ系塗料	エスコNB	側面	54 μm	89.2%	84.8 m ² /h
		下面	57 μm	(-)*	97.3 m ² /h
厚膜型ポリウレタン系塗料	レタン6000HB	側面	50 μm	91.6%	87.6 m ² /h
		下面	44 μm	90.2%	100.4 m ² /h

*:参考値(機械トラブルにより使用量が增大した結果、85.7%)

膜厚の基準値は標準膜厚の75%以上であり「鋼構造物塗装設計施工指針(2005年)」を満たしている

	刷毛塗装	本塗装システム
膜厚分布 測定面積 600×1000 mm		
付着強度 2.0 MPa以上良好	4.2 MPa	4.0 MPa
塗面状態		

図17 施工品質比較

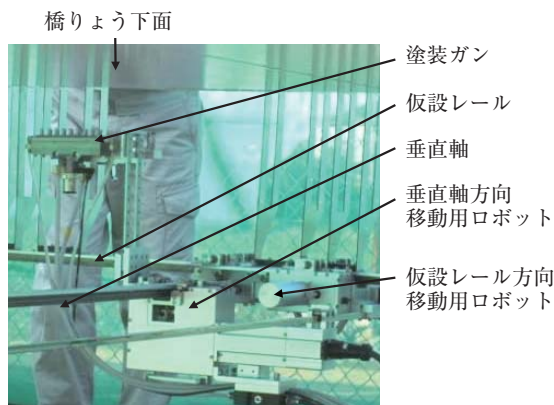


図18 下面塗装の様子



図19 下面塗装後の塗膜状態

5. おわりに

鉄道鋼橋りょうを対象とした塗装システムを開発した。本塗装システムは、①塗料飛散が少なく、②1時間当たり50㎡以上の目標施工効率を達成し、③作業員3人以下で、④作業足場内での施工が可能であり、⑤刷毛塗装同等以上の施工品質を確保することで出来た。したがって、劣悪な環境での作業工程低減や、コスト削減などの可能性が示唆される。脚立を利用した高所仮設レールの着脱方法や内部が複雑化した塗装ガンの洗浄性、そして実際の鋼橋りょうでの大面積連続塗装作業性の確認が今後の課題として挙げられる。

本研究で新たに分かった事項として、刷毛塗装は接触式であり塗膜硬化後でなければ塗り重ねが出来ないため、十分な養生時間が必要となるが、本塗装システムは非接触塗装のため、半硬化塗膜でも塗り重ねが可能であることから、塗装間隔の短縮が期待できる。

更に完成型ではないものの今回開発した塗装ガンを利用して、塗料飛散の少ないハンドガンタイプに応用できる可能性があることも確認できた(図20)。また本塗装システムは仮設レールの構造物への取り付け方法を工夫することで鉄道鋼橋りょう以外の大型構造物の塗替え塗装にも適用可能と考える。今後安定した塗装品質を提供するためにも様々な施工現場への適用範囲を広げていきたい。

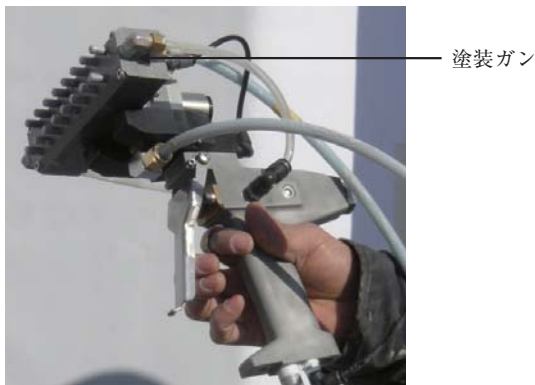


図20 ハンドガン

6. 謝辞

本開発に際し、多大なるご協力・ご指導を頂きました東日本旅客鉄道株式会社殿、建設塗装工業株式会社殿、株式会社計測工業殿に、この紙面を借りて心から感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 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)
- 2) 大本宗治、田中孝司、竹内徹：塗料の研究、**133**、30-34 (1999)
- 3) 市川昭人、竹内徹、檜原篤尚：塗料の研究、**153**、64-69 (2011)
- 4) 竹下直孝：塗装技術、**34** [437]、141-146 (1995)
- 5) 秋山和夫：検査技術、**4** [6]、14-20 (1999)
- 6) 時岡誠剛：油圧と空気圧、**22** [3]、263-268 (1991)