

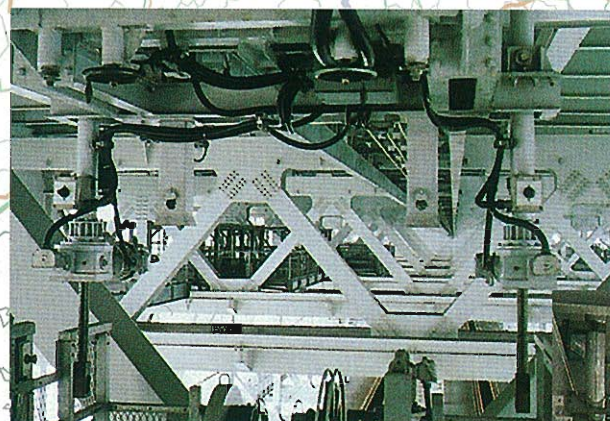
# 長大橋の維持管理用機械設備

## ケーブル作業車



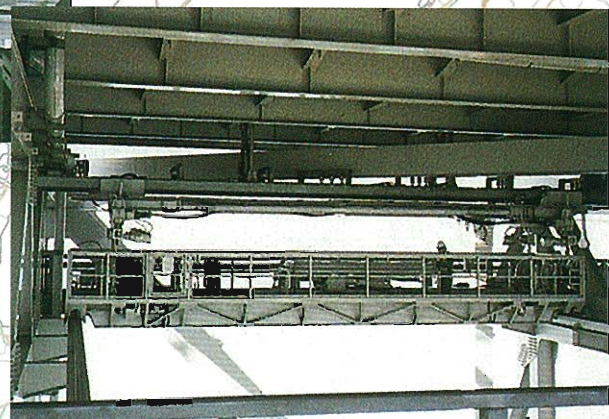
## 点検補修用作業車

桁内面作業車



↑ 吊上装置

徳島



桁内面作業車(櫃石島高架橋)

京都

神戸

大阪



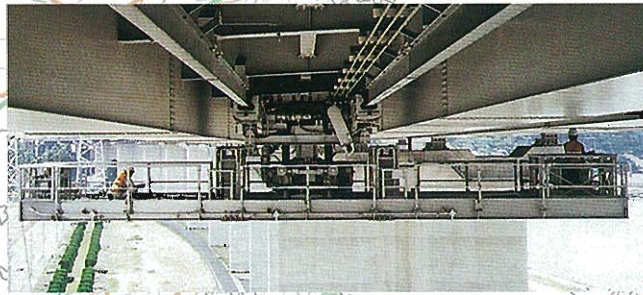
桁外面作業車



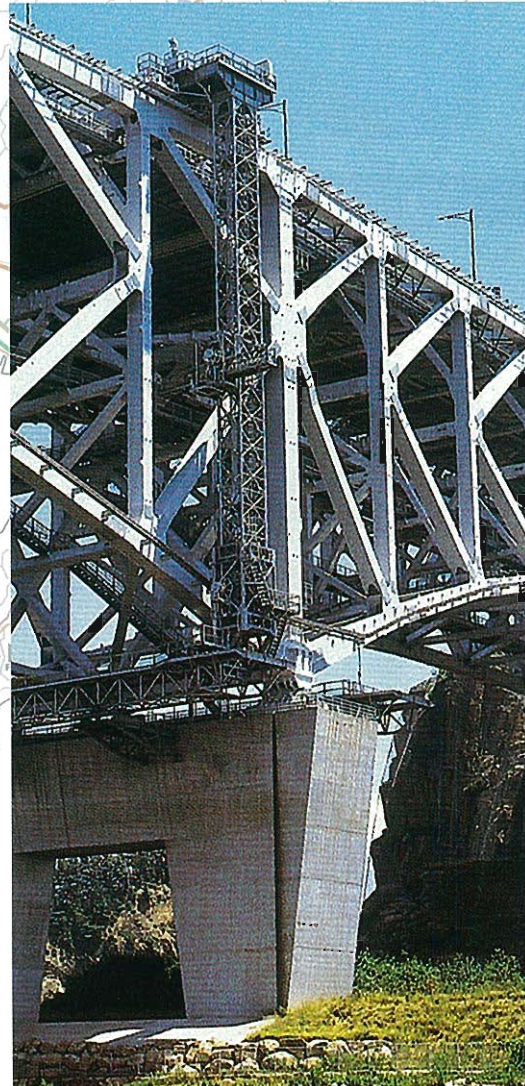
⇨吊橋・斜張橋用作業車  
(北備讃瀬戸大橋)



⇨高架橋(共用部)用作業車(番の州高架橋)



⇨高架橋(道路単独部)用作業車(番の州南高架橋)



⇨曲弦トラス橋用作業車  
(与島橋)





## M3 : maintenance/management/machinery

特集 道路における維持管理機械

# 長大橋の維持管理用機械設備

坂本光重

本州四国連絡橋は、明石海峡大橋を始めとする18橋の長大橋梁群で構成されている。長大橋の主要部材は鋼のため維持管理にあたっては防錆対策が重要であり、表面には6層より成る長期防錆系塗装が施されている。塗装は経年劣化するため点検や塗替えが必要になるが、海上の高所に位置するため接近は容易でない。また、塗装面積が400万m<sup>2</sup>を超えるため塗替費用の縮減が求められ、作業足場に代わる点検補修用作業車を配備している。

さらに、点検や補修塗装の機械化に取組み、主塔の点検補修ロボットや箱桁の塗装ロボットを開発している。

キーワード：長大橋，維持管理，塗替塗装，点検補修用作業車，塗装ロボット

## 1. はじめに

本州四国連絡橋の表面には、6層、合計膜厚250μmの長期防錆系塗装が施されているが劣化状況は様ではなく、現場塗装部やメカニカルダメージ部は早期に劣化する。このため、定期的に点検して局部的な発錆部にはタッチアップ塗装を施し、表層が全体的に劣化した時点で全面に中塗りと上塗りを施す予防保全的塗替えを計画している。

橋体各部の点検や塗替えにあたっては対象箇所への接近が必要になるが、桁高が10mを超える補剛桁や最大300mを超える主塔等、巨大構造物である長大橋への接近は容易でない。また、多数の船舶が航行する航路上の高所作業になるため安全確保が重要であり、その都度の作業足場の架設は現実的でない。このため、主要な橋梁には作業員や補修機材を搭載して橋体の任意の位置に接近する点検補修用作業車を配備している。

さらに、400万m<sup>2</sup>を超える塗装面積を有する長大橋の保全費用の縮減には、点検や塗替塗装の機械化が不可欠であり、主塔の点検補修ロボットや箱桁の塗装ロボットを開発している。

本報文ではこれらの維持管理用機械設備のうち、桁外面作業車、桁内面作業車、磁石車輪ゴンドラ、塔点検補修用ロボット、箱桁用塗替塗装ロボットを紹介する。

## 2. 桁作業車

### (1) 変遷

我が国で最初に設置した関門橋の桁作業車は下面作業台のみであり接近範囲は下横構に限られていた。吊橋の桁高は10mを超えるため次に設置した因島大橋と大鳴門橋では側面フレームを設け主構の側面が接近可能になった。さらに、瀬戸大橋以降は側面フレームに、昇降と桁内に入りする伸縮足場を備え主構全体に接近可能になった。

しかし、補剛桁の断面は幅30m、高さ10mを超えるため桁の外側に設置した外面作業車のみで全体に接近することは不可能であり、瀬戸大橋以降は桁の内側に内面作業車を設置している。これらにより桁の塗装面積の95%程度まで接近することができる。

## (2) 桁外面作業車 (瀬戸大橋用)

桁外面作業車は、桁に添架したレール上を桁の全長にわたって走行する作業車である。図-1に示すように、下面作業台、側面フレーム、伸縮足場によりU字形に構成し、桁の下面と両側面に接近する。また、伸縮足場は側面フレームに沿って昇降するとともに桁内へ進入できるため、桁内部のトラス部材に接近することができる。構造部材はアルミニウム合金であり、軽量化と保全費用の縮減を図っている。

この作業車は作業員10人と2,000kgの機材を積載しトロリー線から給電しながら毎分0~30mで走行することができる。

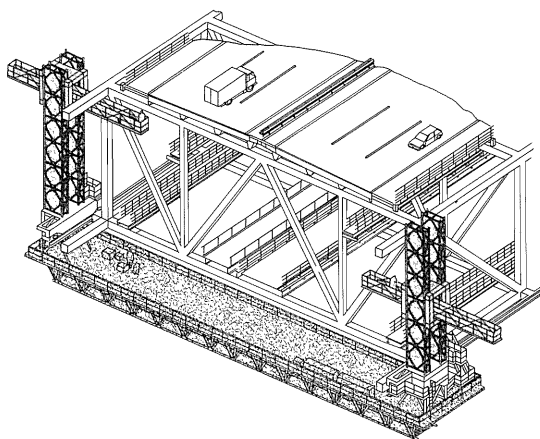


図-1 桁外面作業車 (明石海峡大橋用)

## (3) 桁内面作業車 (明石海峡大橋用)

桁内面作業車は、桁内の管理路に添架したレール上を桁の全長にわたって走行する作業車である。トラス部材が複雑に入り込む桁の内面を通過するため図-2に示すように、走行架台、昇降架台、旋回足場、伸縮足場、補助昇降足場で構成している。これらの足場の動作を組合わせて、外面作業車が接近できない、鋼床版下面や主横トラス部材に接近する。

この作業車は作業員5人と775kgの機材を積載し、走行架台上の発動発電機で給電しながら毎分0~30mで走行することができる。

## (4) 桁内面作業車 (瀬戸大橋用)

瀬戸大橋は道路と鉄道の併用橋であり、桁内の

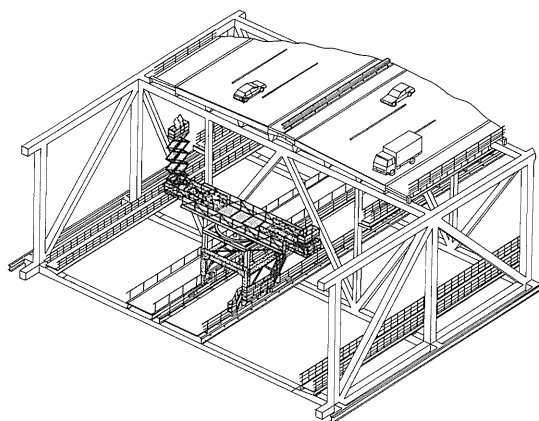


図-2 桁内面作業車 (明石海峡大橋用)

中央部は列車の通過空間のため明石海峡大橋のような桁内面作業車は設置できない。設置スペースは列車の通過空間上部に限られるため、橋軸方向全長に2条のレールと各パネルごと(約12mピッチ)に橋軸直角方向に2条のレールを配置し図-3に示すように、橋軸直角方向に移動する内面作業台と、この作業台上を橋軸方向に移動するとともに昇降する昇降台車、ならびに内面作業台を吊上げて橋軸方向に移動する移設台車で構成している。

各パネル位置で内面作業台と移設台車は切離され、内面作業台の橋軸直角方向と昇降台車の橋軸方向の動きを組合わせて、上横構のトラス部材と鋼床版裏に接近する。

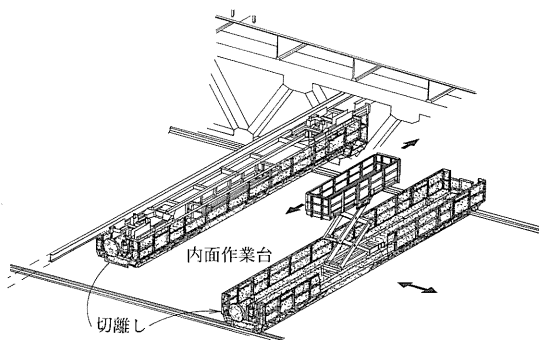


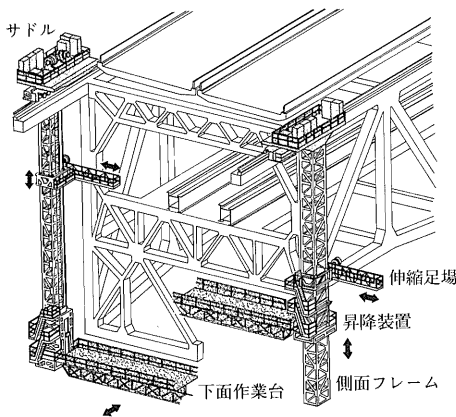
図-3 桁内面作業車 (瀬戸大橋用)

## (5) トラス桁作業車

瀬戸大橋を構成する与島橋や番の州高架橋は3径間連続曲弦トラス橋であり最大桁高は30mに

達するため接近はより困難になる。ここでは図—4に示すように、桁の上弦材と下弦材にレールを配置した。上弦材のレールで荷重と走行力を受けるとともに下弦材のレールで姿勢を保つ側面フレームを設け、この側面フレームに昇降装置と伸縮足場を設けて側面トラス材に接近する。また、下部には走行と並行して、変化する桁高に沿って昇降する下面作業台を設けて下面トラス材に接近する。

この下面作業台は各径間に配備しており、橋脚通過前に切離し、通過後に別の下面作業台とドッキングする動作を繰返して橋の全長に接近する。



図—4 トラス桁外面作業車

#### 4. 磁石車輪ゴンドラ

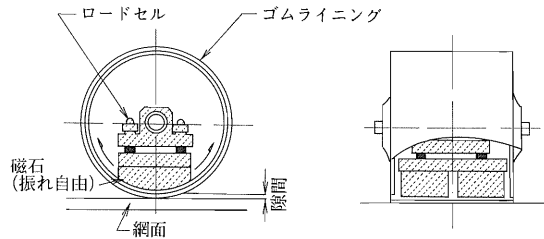
##### (1) 変 遷

主塔は海面上 300 m に達する超高層構造物であり接近手段にはゴンドラが使用されていたがゴンドラは風で揺れやすい難点がある。加えて、塔柱、水平材、斜材等、形状が複雑なため瀬戸大橋（櫃石島橋、岩黒島橋）では塔柱に設けたレールに沿って昇降する専用の作業車を開発した。しかし、レールは美観上好ましくなく、また、レールの設置費と作業車の製作費が高むため、多々羅大橋以降は通常のゴンドラに揺止め用の磁石車輪を付加した磁石車輪ゴンドラを開発した。

##### (2) 磁石車輪

ゴンドラの揺止めには真空吸着パッドや磁石が使用されているが、1 m 程度昇降するたびに盛換

えが必要であり作業能率が低下するため、昇降中も常に連続して吸着できる磁石車輪を開発した。この磁石車輪は図—5に示すように、車輪軸に希土類ネオジウム磁石を振り子状に懸架しているため常に最大の吸着力を得ることができる。



図—5 磁石車輪一般図

この車輪 1 基で 250 kg の吸着力が得られるため風による揺れは皆無であり、作業能率とともに稼働率も向上する。また、車輪に操舵装置を付加することにより横方向に移動できるため短尺のゴンドラで広い範囲に接近することができる。

##### (3) 磁石車輪ゴンドラ

この磁石車輪を保持するフレームを設け、このフレームを市販のゴンドラのケージに取付ければ磁石車輪ゴンドラが構成できる。主要部分であるケージと昇降装置（ワインダ）はリース品を使用することができ、塔への付加設備は頂部の吊り元金具のみになる。

この磁石車輪フレームは、塔柱用、斜材用、水平材用の 3 種類あり、磁石車輪を 1~4 個取付けている。代表例として塔柱用ゴンドラの使用状況を写真—1 に示すが 18 度のオーバハング部も毎分 5 m の速度で安定して昇降することができる。

#### 5. 塔点検補修ロボット

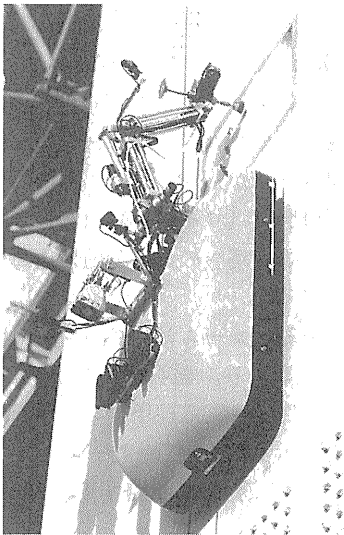
##### (1) 変 遷

塔の全面塗替塗装は前章で述べた磁石車輪ゴンドラで行うが、点検や局所的な発錆箇所のタッチアップ塗装のつど、磁石車輪ゴンドラの設置撤去を繰返すことは煩雑であり、簡易に点検と補修ができる装置が求められた。このため、塔体の任意の位置に接近して、表面状況の確認、発錆の除



写真—1 オーバハング部を昇降する磁石車輪ゴンドラ

去（第一種ケレン）、塗装作業が可能な写真—2  
に示す塔点検補修ロボットを開発した。



写真—2 塔点検補修ロボット

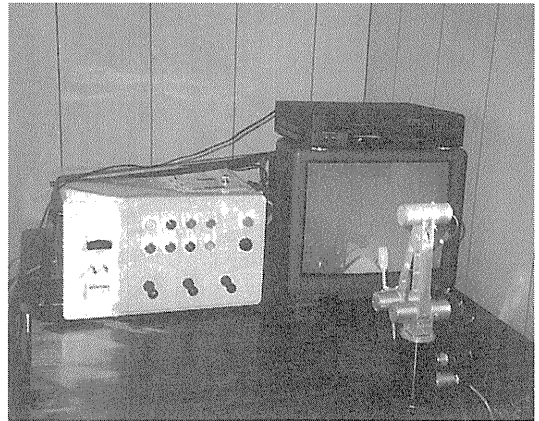
## （2）塔点検補修ロボット

このロボットは図—5に示す磁石車輪で塔壁に吸着する。車輪は前2輪・後1輪であり、3輪で駆動し後の1輪で操向しながら毎分5mで昇降し自力で主塔の任意の位置に接近する。また、前部（上部）に、5自由度（旋回、起伏、屈曲2、回転）のアームを備え、アームの先端にディスク

サンダと塗装ガンを保持している。

ロボットには前後にITVを備えており、この画像を見ながら地上から遠隔操作する。細かい動作が必要なアームの操作にはマスタスレーブ方式を採用している。写真—3に示すように操作卓でITV画像を見ながら40%縮尺のマスタアームを操作すればロボットのアームは忠実にマスタアームの動作を再現する。これにより、狭隘な部分の素地調整や塗装を実現した。

昇降中に、発錆部を発見すると直ちに素地調整をするとともに錆止め塗料を塗布する作業を繰返して塗膜を補修することができるため、タッチアップ塗装ではゴンドラに比べて大幅に省力化できる。



写真—3 ロボットの操作卓

## 6. ケーブル作業車

### （1）変 遷

主ケーブル上のハンドロープ（手摺）をレールとして走行する作業車であり、走行用の駆動装置と作業員が搭乗するケージで構成している。

当初の駆動装置はウインチであり、前方に延ばしたロープを巻取ることにより走行していた。簡便な機構であるが、ハンドロープを支えるスタンション（支柱）の通過時にケージが揺れる難点が生じた。原因はスタンションの前後で作業車の自重によりハンドロープの撓みが変わり、駆動用のロープのカテナリーが変動して加減速が生じるためである。さらに、一定距離走行するごとに必要になる駆動用のロープの盛換えも煩雑であり改善が求められた。

### (2) キャタピラ式走行装置

走行時の加減速を防ぐにはレールとなるハンドロープで駆動反力を確保すればよい。このため、**図-6**に示すように、ハンドロープをゴム製のキャタピラで挟む駆動機構を考案した。

キャタピラゴムは左右のスプリングで押付けており、駆動力は押付け力と摩擦係数の積のため駆動機構の規模はゴムとハンドロープの摩擦係数で決まる。耐久性よりウレタンゴムを採用したが摩擦係数は0.3程度であり、ここでは、ウレタンゴムに珪砂を混入した特殊ゴムを開発して摩擦係数0.5以上を確保した。

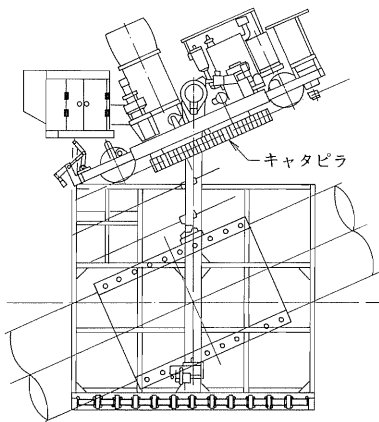


図-6 キャタピラ式走行機構

### (3) ケーブル作業車

ケーブル作業車は**写真-4**に示すように、ハンドロープ上の駆動装置と駆動装置で支持する左右

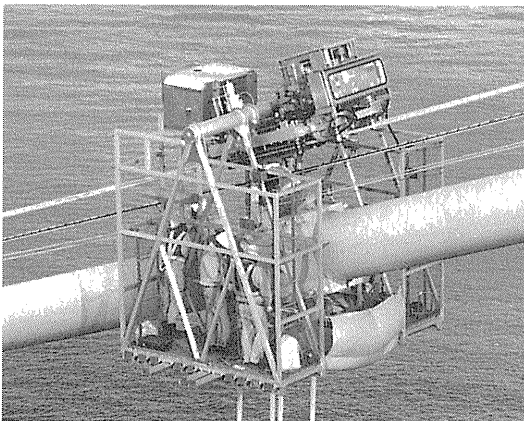


写真-4 ケーブル作業車

のケージで構成している。ケーブルの左右のケージとケージ下面のスライド床により、ケーブルとケーブルバンドの全周に接近する。

この作業車は走行用のエンジンを搭載しており800 kgの機材や作業員を搭載して最大25度の傾斜を毎分6 mで走行することができる。

## 7. 箱桁用塗装ロボット

### (1) 変遷

自動車産業に見られるように工場塗装はロボットで施工されており、塗替塗装の機械化も強く望まれてきたが本格的な実施例は皆無である。

本州四国連絡橋でもディスクサンダによる素地調整とスプレー塗装による機械化を試みたが実用化にいたらなかった。原因は、ディスクサンダでは溶接ビードや溶接歪み部で仕上がりが乱れ、スプレー塗装ではミストが飛散するとともに大量の跳ね返りが生じるためである。溶接ビードや溶接歪みによる5 mm程度の凹凸は鋼構造物では避けることができず、また現場における塗料の飛散防止は周辺環境保全上の絶対条件である。

したがって、塗替塗装の機械化を実現するためには、溶接ビードや溶接歪みに影響されない素地調整方法と、ミストの飛散しない塗装方法の開発が必要になる。

### (2) 素地調整方法

素地調整は砥粒入りナイロン線材を回転軸に巻付けた円柱状の回転ブラシを考案した。ナイロン線材は柔らかいため凹凸に馴染む。また研削力は高速回転で生じる遠心力で得ることができる。遠心力は半径に比例するため、ブラシの半径を50 mmにすれば5 mmの凹凸で生じる接触圧の変動は10%になり実用上は十分である。また、全体を密閉したケースで覆い集塵機で吸塵してケレン粉の飛散を防止している。

### (3) 塗装方法

塗装は原理的にミストを発生しないロール塗装とする。ロール塗装では凹凸により塗膜に変動が生じるため、芯材に柔らかいスポンジゴムロールを採用し、その外周は塗料を遮断するプラスチック

クフィルムで覆い、その外周に塗料を含む起毛材の3層から成る塗装ロールを考案した。

柔らかいロールでも凹凸部では微妙に接触圧が異なり塗膜厚が変動する。ロール塗装は進行方向にロールを回転させる順回転塗装と逆方向に回転させる逆回転塗装があり塗膜厚が異なる。

実験によると順回転では凹部では十分な塗膜厚は得られるが凸部では薄く、逆回転では凸部では十分な塗膜厚が得られるが凹部では薄い正反対の結果が得られた。このため、前方を順回転、後方を逆回転する2連装ロールとして塗膜厚を均一化した。

#### (4) 塗装ロボット

塗装ロボットは走行台車と、回転ブラシや塗装ロールを保持するアームで構成しており桁外面作業車に搭載する。このアームは、5自由度（起伏、

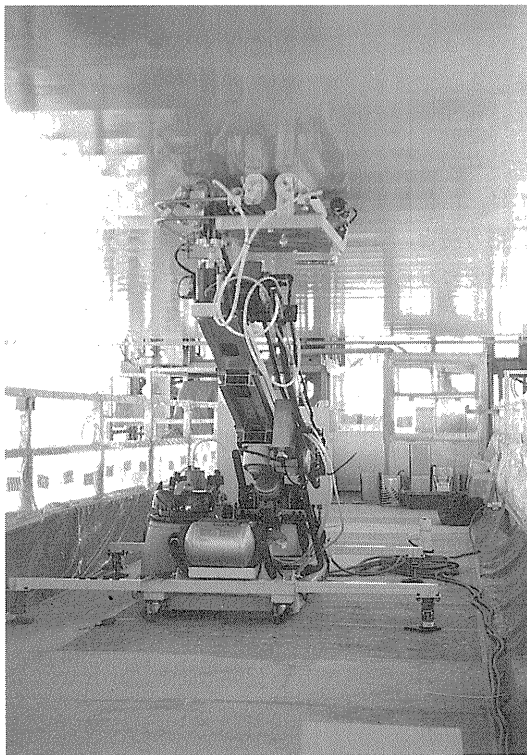


写真-5 塗装ロボット

旋回、伸縮、屈曲、回転)を持ち、先端に取付けた塗装ロールや回転ブラシを塗装面にセットする。この状態で作業車を走行させれば回転ブラシの幅分素地調整でき、塗装ロールの幅分塗装できる。作業車の走行速度は6m/分、塗装ロールの幅は50cmであり塗装能率は180m<sup>2</sup>/hになる。実施工では、準備や片付け等が必要になるが1日当たり500m<sup>2</sup>以上施工している(写真-5参照)。

また、塗装品質は、塗膜厚の変動、表面の滑らかさ、付着力とも刷毛塗りに比べて遜色のない出来栄が得られている。

## 8. おわりに

これまで述べてきたように、各種の点検補修用作業車により接近範囲は大幅に向上し明石海峡大橋では全体面積の95%以上に接近することが可能になり、作業の合理化が図られている。しかし、塗装作業は依然として人力で施工されており、ようやく箱桁の塗装作業が機械化された段階である。塗替塗装は苦渋作業の一つでもある。また、今後の少子・高齢化社会の到来や建設投資の減少を考えると機械化による省力化と保全費用の縮減が必要であり、長大橋の維持管理作業の今後の主要な課題は塗替塗装の機械化になる。

特に対象面積の大きなトラス桁部材の機械化が不可欠になるが、部材が複雑に入組むため容易ではない。このため、今回の箱桁の塗装の機械化に続き、主塔の塗装の機械化に取組み、これらの施工で得られるノウハウを蓄積し、トラス桁の塗装の機械化を図る計画である。

J C M A

#### 【筆者紹介】

坂本 光重 (さかもと みつしげ)  
本州四国連絡橋公団  
保全部  
設備課長  
工学博士  
技術士 (建設部門)

