

# 新工法による塗膜剥離時の 作業環境に関する実験的計測

南城和幸<sup>1</sup>・川上修<sup>2</sup>

<sup>1</sup>大阪国道事務所 西大阪維持出張所 管理第二係長 (〒551-0002大阪府大阪市大正区三軒家東5-6-4)

<sup>2</sup>酒井工業株式会社 大阪本社 技術部長 (〒559-0025大阪府大阪市住之江区平林南1-3-30)

鋼橋の塗装塗替えや落橋防止構造等の取付工事では既存塗膜の除去が必須となる。既存塗膜の剥離工法は、ブラストや塗膜剥離剤が主流であるが、これらの工法による鉛中毒、火災、ベンジルアルコール中毒などの労働災害が報告されている。したがって、より安全な工法の開発が望まれている。今回は塗膜剥離工法として、レーザークリーナー、およびIHヒーターをとりあげた。両者ともに、施工実績は少なからずあるものの、その作業環境についての報告例は殆どない。本稿は、それらの工法を用いた場合の作業環境について、実験的に詳細な計測を実施した結果を報告するものである。

キーワード： レーザークリーナー、IHヒーター、塗膜剥離、PCB含有塗膜、新工法

## 1. はじめに

大阪国道事務所では458の橋梁を管理しており、このうち約20%が鋼橋である。鋼橋の維持修繕工事（塗装塗替え、耐震補強など）では既存塗膜の剥離工程が必須となる。「国道43号 中島出来島橋（下）補強補修工事（2021.4.1～2022.3.30）」で本施工に先立ち実施した塗膜分析（事前塗膜分析）により既存塗膜は、PCB、および鉛を含有している有害塗膜であることが判明した。PCB含有塗膜を有した橋梁工事が決して多くはない実情から、施工者より新工法（レーザークリーナー（図-1）およびIHヒーター（図-2））の試験フィールドとして活用したい旨の提案があった。

本稿は、それらの新工法を用いて塗膜を除去した場合の作業環境について実験的に実施した計測結果を報告するものである。

## 2. 背景および目的

塩素化ビフェニル（ポリ塩化ビフェニル、PCB：以下PCBと略す）含有物は、PCB特措法により2027年3月末までに処分委託を完了する必要がある、それまでにPCBを含む既設の塗装塗膜についても完全に除去することが求められている。しかし、塗膜除去作業における作業者のPCBばく露実態についての知見が少なく、厚生労働省において2020年度よりばく露実態調査が開始されている。また、橋梁等の塗膜中にはPCBのみならず、防錆剤や顔料として鉛やクロムの重金属等も含有されており、それらのばく露実態や健康障害リスクについての知見も少ないのが現状である。さらには、橋梁等塗膜除去作業においては乾式（ディスクグラインダー、ブラスト等）と湿式（塗膜剥離剤）の剥離方法があるものの、乾式では発じんが大きく、有害物質を含む粉じんにより作業者の健



図-1 レーザークリーナーによる作業状況



図-2 IHヒーターによる作業状況

健康被害が懸念され、湿式では溶剤による中毒や環境への漏えい、火災発生等の恐れが指摘されている。よって、橋梁等の塗膜除去工法においては、これらの問題を解決できる適切な作業強度（作業員への負担の度合）での塗膜除去工法が望まれている。

今回、新たな工法として作業強度が比較的軽く、さらには産業廃棄物量を必要以上に増やすことの無い工法としてレーザー照射、およびIHヒーター加熱による塗膜除去工法を用いた。

これらの新工法での塗膜除去作業は、一部では実現しているものの、作業環境についての報告例は殆どない。したがって、本工事において模擬的に剥離作業を実施し、新工法での作業員の健康障害リスクの特定、および必要な防護設備や作業標準書作成の一助とすることを目的に調査を実施した。

### 3. 新工法の概説

レーザークリーナーは、レーザー光（光エネルギー）を集約して加工面に照射することで、母材に傷を与えずに、錆や塗膜などの付着物のみを除去する技術である。レーザーの出力を、一定して連続的に発振するものを連続波レーザー（Continuous Wave Laser）と呼び、断続的に発振して、レーザーのエネルギーを短時間に集中させることで高出力パルスを得る仕組みのものをパルスレーザー（Pulsed Laser）と呼んでいる。今回、前者は2,000W級を、後者は350W級のものを用意した。

IHヒーターは、電磁誘導加熱の原理により鋼材を加熱することで、既存塗膜を間接的に加熱・軟化させ、軟化塗膜をスクレイパーで削り落として除去する技術である。

両者ともに作業員が手持ちする機材が軽量であり、ブラストと比較すると粉じん濃度も低く、研削材や剥離剤などの2次的な廃材がないため、発生する廃棄物は既存塗膜のみとなるのが特徴となる。

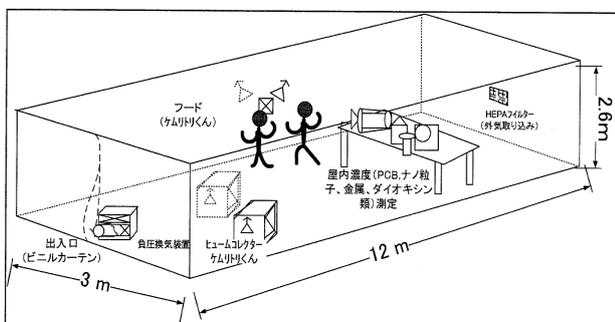


図-3 作業エリアの概況

### 4. 計測計画

#### (1) 測定エリアの分類

測定は、主桁で分割した区画を密閉養生し、①G1区画：レーザー（連続波）塗膜除去、②G3区画：レーザー（パルス）塗膜除去、③G2区画：IHヒーターを用いた塗膜除去、④G2区画：IHヒーター塗膜除去面へのレーザー（パルス）塗膜除去の4作業を実施した（図-3）。工程は、各エリアとも4時間（午前、午後）とし、合計2日間の計測を行った。

#### (2) 測定項目と測定・分析者

測定項目は、①事前塗膜分析とは別途、模擬作業個所での既存塗膜分析、②個人ばく露濃度測定として、PCB濃度、粉じん濃度、③作業エリア濃度測定として、PCB濃度、ダイオキシン濃度、粉じん濃度、ナノマテリアル粉じん濃度、④バックグラウンドエリア濃度測定（ダイオキシン濃度を計測していない以外は作業エリアと同じ。ただし、1日毎）とした。また、採取した粉じんより金属濃度（鉛、クロム、鉄）を求めた。なお、これらの計測は、中央労働災害防止協会および国立大学法人金沢大学古内研究室（同研究室が開発したパーソナルナノサンプラーを使用）が合同で実施した（図-4、図-5）。

#### (3) 分析手法

分析手法は表-1のとおりとした。



図-4 個人ばく露測定器具の装着状況



図-5 粉じん類、ダイオキシンサンプラー

表-1 分析手法の一覧

①空気中PCB NIOSH Manual of Analytical Method 5503 準拠 ガスクロマトグラフ/高分解能質量分析法
②空気中ダイオキシン類 ダイオキシン類に係る大気環境調査マニュアル(平成20年3月環境省)準拠 高分解能ガスクロマトグラフ/高分解能質量分析法
③粉じん濃度等 NIOSH Manual of Analytical Method 0500,0600等準拠 電子天秤にて秤量
④塗料中PCB濃度等 低濃度PCB含有廃棄物に関する測定方法(第5版)塗膜くず準拠 ガスクロマトグラフ-高分解能質量分析法(GC/MS/MS法) 金属含有量:底質調査方法平成24年8月5.2.4/ 5.5.4/ 5.12.2.3 準拠
⑤気中金属濃度 原子吸光法 作業環境測定ガイドブック分析法

## 5. 計測結果の評価手法

今回の計測結果を評価する手法は、日本産業衛生学会が示している評価基準(ばく露評価区分(表-2))を準用した。なお評価値は、作業員2名が実施する模擬作業が調査対象であることから、サンプル数が少ない場合の評価値の対応に準拠して、X95(上側95%推定値)は2名の算術平均値(AM)の3倍値を用いた。また、基準値となる日本産業衛生学会の勧告する許容濃度やACGIHのTLV-TWAは、8時間労働時の作業員ばく露濃度の指標であるが、今回の模擬作業では約4時間の作業であるため、4時間荷重平均値を8時間荷重平均値とみなして評価した。

## 6. 計測結果

本計測では、多種多様な分析を実施したが、本稿では紙面の関係から評価等に支配的な結果について報告する。

なお、計測結果は、今回採用した工法を適用した場合の代表値としての意味合いをもつものではないことに留意していただきたい。これは、①通常の工事と比較して狭隘な空間を密閉して作業を実施したこと。②局所排気

表-2 評価に用いた管理区分の定義

管理区分	定義	解釈(判定)
1A	X95 < OEL かつ	X95 < OEL・10% 極めて良好
1B		AM < OEL・10% 十分に良好
1C		OEL・10% ≒ AM 良好
2A	AM ≒ OEL ≒ X95 かつ	環境対策の有効性を精査、 更なるばく露低減に努める
2B		OEL・50% < AM リスク低減措置を行う
3	OEL < AM	リスク低減措置を速やかに行う

注) OEL:ばく露限界値(=許容濃度),AM:算術平均値,X95:対数正規分布の95%上限値

を必ずしも有効に機能させられたわけではなかったこと。③機材の出力やレーザーの照射方法、または温度状況は、用いる機器により大きく左右されること。④既存塗膜の性状によっても結果が大きく左右されること。などが理由としてあげられる。

### (1) 塗膜分析

事前の塗膜分析は、塗膜採取の容易な橋脚近傍で実施していたが、それらとは別途、作業前に各区画にて塗膜剥離剤にて試料採取した。また、各作業を実施後に剥離した塗膜くずを採取し、これらの成分分析を実施した。

剥離前の塗膜分析では、PCBについての事前分析値が100 mg/kg程度であったのに対し、その値が5,000 mg/kg程度と約50倍も高濃度である結果となった。一方、鉛は事前分析値の53,000 mg/kgに対して若干の差異はあるものの概ね同等であった。この原因は結論付けられなかったが、両者とも塗膜剥離剤により採取した試料を乾燥重量比で分析していることから分析方法に大きな違いはない。そのため、既設橋の塗膜性状は採取箇所により大きく変動する可能性があるとも考えられる。また、塗膜に強固に付着している排気ガス等の粒子状物質の濃度が影響している可能性も否定できない。

作業後に回収した塗膜くずの分析では、PCB濃度について、レーザークリーナーを用いた場合は濃度が減少していることに反し、IHヒーターでは既存時よりも濃度が増加していた。鉛濃度においても程度の差はあるものの同様の傾向を示していることに対し、クロムと鉄では全てにおいて既存塗膜より塗膜くずの方が高い値を示す結果となった(表-3)。

表-3 塗膜分析の結果

単位: mg/kg	①レーザー (連続波)		②レーザー (パルス)		③IHヒーター		④IH後 レーザー (パルス)	
	既存塗膜	除去後の 塗膜くず	既存塗膜	除去後の 塗膜くず	既存塗膜	除去後の 塗膜くず	除去後の 塗膜くず	除去後の 塗膜くず
PCB	5,600	140 3%	4,800	1,200 25%	4,600	7,600 165%	3,200 70%	
鉛	73,000	56,000 77%	66,000	53,000 80%	56,000	65,000 116%	79,000 141%	
クロム	2,700	5,300 196%	2,300	3,000 130%	1,800	2,200 122%	4,400 244%	
鉄	50,000	91,000 182%	38,000	54,000 142%	39,000	42,000 108%	85,000 218%	

※既存塗膜と比べて増加したものに着色した

### (2) 個人ばく露

作業員呼吸域(ばく露)でのPCB濃度は、IHヒーターによる塗膜除去作業において、算術平均値が許容濃度を超える結果となった(管理区分3)が、他の作業での算術平均値は、許容濃度の50%以下(管理区分2以下)となった(表-4)。

表-4 PCBばく露調査結果

呼吸域PCB濃度 許容値： 0.01 mg/m <sup>3</sup>	①レーザー (連続波)	②レーザー (パルス)	③IHヒーター	④IH後 レーザー (パルス)
AM	0.00465	0.00300	0.19500	0.00150
X95	0.014	0.009	0.585	0.005
管理区分	2A	1A	3	1C

表-5 吸入性粉じんばく露調査結果

吸入性粒子径 粉じん濃度 許容値：1.0 mg/m <sup>3</sup>	①レーザー (連続波)	②レーザー (パルス)	③IHヒーター	④IH後 レーザー (パルス)
AM	6.84	0.91	1.02	0.16
X95	20.52	2.73	3.07	0.49
管理区分	3	2B	3	1C
吸入性粒子径 鉛濃度 許容値：0.03 mg/m <sup>3</sup>	①レーザー (連続波)	②レーザー (パルス)	③IHヒーター	④IH後 レーザー (パルス)
AM	1.420	0.060	0.020	0.019
X95	4.260	0.180	0.070	0.056
管理区分	3	3	2B	2B

吸入性粒子質量濃度は、IH後レーザー作業で管理区分が1となった。連続レーザー、パルスレーザー、IHヒーターのいずれにおいても粉じん量は多く、鉛も飛散する結果となった。なお、IHヒーターで計測された、粒子径が比較的大きな粉じんは、作業を観察した結果、スクレーパーによるかき落とし作業時に特によく発生していると見受けられた(表-5)。

(3) 作業エリアおよびバックグラウンド

a) PCBおよび粉じん濃度

計測結果は、呼吸域ではないため許容濃度と直接に関連する値ではない。そのため、許容濃度との比較判定は行わず、計測結果の報告のみとする(表-6)。なお、レーザー(連続波)時の粉じん濃度が呼吸域よりも遥かに大きくなっているが、これは局所排気装置をうまく稼働できなかった時間帯があったことが影響したためであり、通常であれば呼吸域と大差ない、または少し下がる傾向にあると考えて差し支えないと思われる。

b) ダイオキシン濃度

作業区域の室内ダイオキシン類濃度は、すべての作業区画において管理すべき濃度(ダイオキシン類濃度2.5pg-TEQ)を超える結果となった(表-7)。

PCB含有塗膜を加熱するため、ダイオキシン類の発生は必然である(ダイオキシン類の発生は、約300°C付近で最も多い事が知られている)。今回の作業においても、レーザー照射、IHヒーターによる熱でPCBや塩素系物質

が加熱されることにより発生したものと考えられる。

ダイオキシン類は粒子状での発生が主体となっている。レーザー(連続波)では局所排気の不具合により飛散したダイオキシン類が、ほぼ滞留している作業エリア内に濃縮された結果、比較的高い値になったと考えられる。

なお、試算として今回の最大濃度を焼却施設のダイオキシン類排出基準(処理能力2 t/h未満の新規施設で5,000 pg-TEQ/m<sup>3</sup>、排出ガス量を5,000 m<sup>3</sup>/tと仮定)と比較した場合、排出基準の10%程度(作業時の排出ガス量を10 m<sup>3</sup>/min、濃度1.7倍、時間当たり排出ガス量0.06倍と仮定)の値となる。

表-6 作業エリア、バックグラウンドのPCBおよび粉じん等

単位：mg/m <sup>3</sup>	①レーザー (連続波)	②レーザー (パルス)	③IHヒーター	④IH後 レーザー (パルス)
●PCB濃度	0.0043	0.021	0.240	0.004
	0.00005		0.00004	
①総粉じん				
粉じん濃度	27.50	0.21	1.33	0.21
	0.04		0.04	
鉛濃度	6.752	0.024	0.028	0.013
	0.0003		0.001	
クロム濃度	0.29	0.001	0.002	0.001
	0.00004		0.0001	
鉄濃度	2.44	0.02	0.03	0.04
	0.001		0.001	
②吸入性粉じん				
●粉じん濃度	21.95	0.39	0.48	0.12
	0.02		0.02	
●鉛濃度	6.285	0.060	0.003	0.012
	0.0004		0.0003	
クロム濃度	0.21	0.003	0.00001	0.001
	0.0001		0.00003	
鉄濃度	1.94	0.05	0.006	0.02
	0.001		0.0002	

注1) ①SKC社製カセットフィルター ②レスピラブルサイクロンサンプラー

注2) 上段：作業エリア、下段：バックグラウンド

注3) ●付きは表-4、表-5にて呼吸域計測値を示している

表-7 作業エリアのダイオキシン類

単位：pg-TEQ/m <sup>3</sup>	①レーザー (連続波)	②レーザー (パルス)	③IHヒーター	④IH後 レーザー (パルス)	
ガス状	PCDD類	3	1.1	1.2	1.3
	PCDF類	470	54	1.6	44
	Co-PCB類	27	21	17	11
	ダイオキシン類	500	76	19	57
粒子状	PCDD類	61	7.1	7.3	1.5
	PCDF類	7,700	630	57.0	98
	Co-PCB類	100	57	422	5.5
	ダイオキシン類	7,900	700	490	110
含量	ダイオキシン類	8,300	790	500	160

## 7. まとめ

今回の実験的計測結果から、以下の知見を得た。なお、これらは今回使用した機材と既存塗膜に限った結果ではあるが、これまでに知見が皆無に等しかった新工法を用いた場合の作業環境を把握できたことは、作業員の労働災害防止の観点から極めて有用な結果であると考えられる。

- ① PCB含有塗膜をレーザークリーナー、あるいはIHヒーターで剥離する場合、作業員呼吸域には、PCBを含有する粉じんが発生する。既存塗膜のPCB含有率が低濃度限界値付近（5,000 mg/kg）の既存塗膜においては、ばく露濃度は相対的に低いと考えられる。ただし、一部はダイオキシン類に変質し、作業環境の管理濃度基準より高い濃度を示す可能性がある。  
⇒ 適切な防護が必要。
- ② 鉛含有塗膜をレーザーあるいはIHヒーターで除去する場合、作業員呼吸域には鉛を含有する粉じんが発生する。  
⇒ 適切な防護が必要。

- ③ レーザークリーナー、IHヒーターはともに、一見すると作業環境がそれほど悪くない工法であると思われがちだが、前述の2点より、作業員の労働災害防止の観点からは、適切な呼吸用保護具、および経皮吸収を抑制する防護服の着用が必要であると考えられる。
- ④ 作業環境の改善を行う場合には、粉じん発生源の直近でHEPAフィルターを具備する局所排気装置の使用が有効である。
- ⑤ ダイオキシン類は粒子状での発生が支配的となる可能性が高く、局所排気装置の使用により作業エリアのダイオキシン濃度を低減できる可能性が高い。

**謝辞：**本研究にあたっては、これらの実験的計測を提案し、自社の技術開発として率先して行動していただいた酒井工業株式会社、ご多忙中にも関わらず世界でも稀な高度な計測機器を用いて計測、および分析とりまとめを実施していただいた中央労働災害防止協会 東久保氏、小川氏、青木氏、金沢大学 古内教授、畑准教授 他関係各位に深く感謝の意を表します。