

路面高圧水洗浄における路面性状の影響に関する研究

小林 正利^{1*}、清水 忠昭²、平山 貴浩³

¹株式会社福田組 技術部 (〒951-8668 新潟県新潟市中央区一番堀通町3-10)

²福田道路株式会社 技術研究所 (〒959-0415 新潟県新潟市西蒲区大潟2031)

³(株) EARTHSHIELD (〒963-8041 福島県郡山市富田町字権現林11)

The Study of Road Surface Micro-texture's Effects for the Pavement's Decontamination by High Pressure Water Washing

Masatoshi KOBAYASHI^{1*}, Tadaaki SHIMIZU², and Takahiro HIRAYAMA³

¹Technical Divisin, Fukuda Co., Ltd. (3-10 Ichibanbori-Dori, Chuo-ku, Niigata, Niigata 951-8668 Japan)

²R&D Lab., Fukuda Road Construction Co., Ltd. (2031 Ogata, Nishikan-ku, Niigata, Niigata 959-0415 Japan)

³Earthshield Co., Ltd. (11 Aza- Gongennbayashi, Tomita-cho, Koriyama, Fukushima 963-8041 Japan)

Summary

In the result of “decontamination technical demonstration project” by Ministry of the Environment, it has become clear that the effect variation is larger in high pressure water washing method, compared with others in road surface decontamination technology. In this study, we have hypothesized the fact at the difference of micro-texture of the road surface, by carrying out high pressure water washing method in different kinds of road surfaces and verified the relation between washing efficiency and micro-texture road surface. Positive correlation has admitted between the washing number of times and radiation reduction rate and the trend of primary regression equation (i.e. radiation reduction rate per washing time) is indicating that decreasing tendency of radiation carried by the increasing of micro-texture of the road surface. Here, we proposed the method to estimated essential washing number of times to achieve the targeted radiation reduction rate from the relation of that trend and micro-texture of the road surface.

Key Words: Decontamination, Micro-texture of a road surface, Washing with high-pressure water, Radiation reduction rate

1. はじめに

東日本大震災における福島第一原子力発電所の事故による放射能汚染が顕在化してから、環境省および関係自治体による除染技術実証事業が行われ、各種除染対象物に対する除染技術の評価がなされた¹⁾。

公共施設として最も洗浄対象面積が大きい道路については、切削工法（ブラスト工法含む）と高圧水洗浄工法について評価がなされた。前者は、除染効率が低い、発生廃棄物量が多いと評価された。一方、後者は発生廃棄物量は少ないが、前者と比較して除染効果が低く、除染効率のばらつきが大きいと評価された¹⁾。高圧水洗浄工法の除染効果のばらつきが大きい要因として、洗浄圧力、路面と高圧水噴射装置の距離、洗浄水回収性能等の機械的仕様の差異が大きいと考えられる¹⁾。

その一方で、舗装路面の性状は同一仕様の舗装であっても、車両交通量、気象条件、経年変化等の諸条件により異なり、すべり抵抗や路面騒音等の物理特性に影響を及ぼすことが知られている^{2,3)}。このことから、高圧水と路面の物理的作用である高圧水洗浄工法において、舗装路面の性状の違いが洗浄効率のばらつきの原因の一つであることが示唆される。路面性状と洗浄効果に相関性が認められれば、除染計画において路面性状に基づく洗浄条件設定が可能になるものと考えられる。

舗装路面性状は、“わだち掘れ”に代表される巨視的な路面性状と“キメ”や“粗さ”と表現される微視的な路面性状（マイクロテクスチャ）に大別される。

本研究においては、路面のマイクロテクスチャ（以下、路面

*Corresponding author: E-mail: kobayashi@fkd.co.jp

Table 1 洗浄装置仕様

項目	仕様
洗浄・吸引装置径	φ 30 cm
洗浄水压	15 Mpa
吸引能力	5.0 m ³ /min - 23.0 kpa
洗浄速度	0.5 m/s



Photo.1 高圧水洗浄実験状況

テクスチャ)と高圧水洗浄工法による洗浄効果の関係を明らかにし、高圧水洗浄工法による除染計画を適正化することを目的とした。

2. 試験方法

(1) 高圧水洗浄

本研究において高圧水路面洗浄装置として、ハンディタイプの吸引型高圧洗浄機「吸極」((株)EARTHSHIELD 社製)を使用した。

高圧水により路面の堆積物を洗い出し、それと同時に使用した水と放射性物質を含む汚泥を吸引回収する機構となっている。装置仕様を Table 1 に、高圧水洗浄実験状況を Photo.1 に示した。

(2) 試験実施概要

試験実施概要を Table 2 に示した。試験は郡山市内住宅生活道路 2 路線 (路線 A、B) および沿線の駐車場で実施した。測定対象となる路面は、きめ深さの異なる密粒アスファルト舗装、コンクリート製 L 型側溝上、インターロッキングブロック舗装 (以下、ILB) から計 10 路線を選定した。また、本実験実施箇所は平成 23 年に除染済みであるため、表面線量は環境省除染実証事業で報告されている値¹⁾の 1/10 程度であった。

実験手順は、まず除染作業前に測定対象路面の表面線量および路面のきめ深さを計測した (3 箇所 / 工区)。各試験の

Table 2 試験実施概要

項目	内容
試験箇所	郡山市内 住宅生活道路部
試験条件	平成 24 年 12 月、晴れ、気温 2℃
対象路面	密粒アスファルト舗装 車道中央×2路線、車道路肩×2路線、 取付道路継目×2路線、駐車場×1箇所 コンクリート製 L 型側溝上×2路線 ILB (中央部、路肩) 計 10 路面×4 工区 (洗浄回数 n = 1~4)
工区延長	10 m / 工区

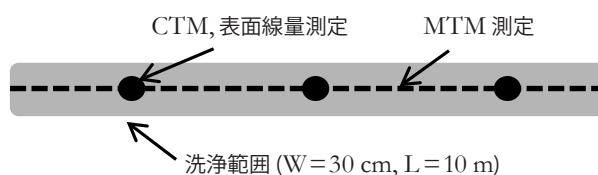


Fig.1 測定箇所イメージ

Table 3 洗浄水使用状況

項目	路線 A	路線 B
使用水量 (L)	150	55
洗浄面積 (m ²)	125.4	105
単位使用水量 (L/m ²)	1.2	0.5
回収量 (L)	130	50
回収率 (%)	86.7	90.9

測定箇所イメージを Fig.1 に示した。その後、洗浄速度・水压 (単位面積当たりの水量) を一定とし、測定対象路面を所定の回数 (n = 1~4) 洗浄した後、除染作業後の表面線量を測定した。

当該実験を行った 2 路線において使用した水量、洗浄面積、および回収率を Table 3 に示した。路線 A、B において、単位使用水量と回収率に差異が認められた。これは、路線 A においては、給水ホースの接続不具合による洗浄水の漏出があったこと、および多孔質体である ILB 工区が含まれるためと考えられる。

3. 測定結果

(1) 路面テクスチャ測定

路面テクスチャの測定は「回転式きめ深さ測定装置を用いた舗装路面のきめ深さ測定方法」⁴⁾を適用した。

この測定には「回転式テクスチャメーター (CT メーター) ASTM:E-2157-01」を用いた。CT メーターは CCD レーザー

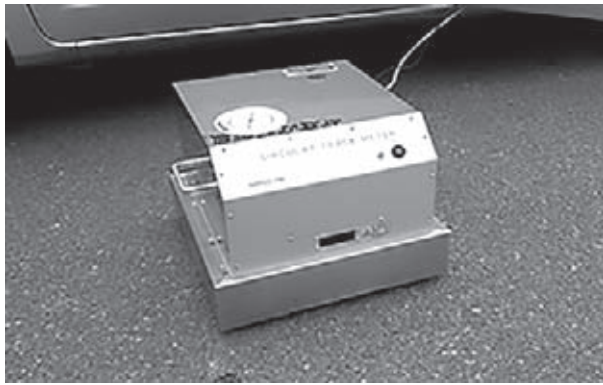


Photo.2 CTメーター

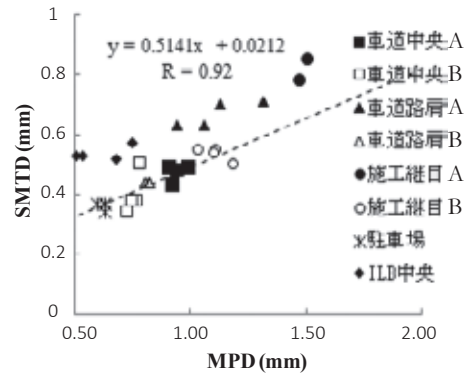


Fig.2 SMTDとMPDの関係



Photo.3 ミニテクスチャメーター

変位センサを使用した路面粗さ計である。計測器本体とPCからなる測定装置で、路面の凹凸形状を0.87 mm 間隔で計測する。本測定装置で得られた計測値はMPD(Mean Profile Depth: 単位 mm)として評価される。CTメーター概観をPhoto.2に示した。

本研究においては、CTメーターにより詳細な凹凸形状を測定し、除染効率と凹凸形状の関係を明らかにするとともに、「ミニテクスチャメーター (MTM[®])」⁴⁾による測定を並行して実施し、延長方向の連続測定が可能な評価方法により除染計画を策定可能な指標を検討した。

MTM[®]は、小型で持ち運びが簡単な手押し式の装置で、きめ深さを迅速に測定できる。この測定器は10 m 測定区間ごとのきめ深さ(SMTD: 単位 mm)が測定される。MTM[®]概観をPhoto.3に示した。

各工区における路面テクスチャ測定から得られたMPDとSMTDの関係をFig.2に示した。MPDは3箇所/工区の平均値とした。

アスファルト舗装の路面テクスチャは適用箇所により異なり、駐車場、車道中央、路肩、施工継目の順に粗くなる傾向が見られた。ただし、同一条件でも路線A、Bで数値は異なり、

路線毎の評価が必要と考えられる。

コンクリート製L型側溝ではMTM[®]の走行に必要な幅員が取れず測定できなかったことから図中に示していない。なおコンクリート製L型側溝のMPDは0.21 mmおよび0.3 mmでありアスファルト舗装に比べ平滑である。

図中にアスファルト舗装のデータに対する一次近似直線および近似式を示した。MPDとSMTDの間に非常に強い相関性が認められ、アスファルト舗装の路面テクスチャの評価に簡易的な測定方法であるMTM[®]を適用できると考えられる。

一方、ILB(中央)についてはSMTDがアスファルト舗装よりも高い値を示す傾向が見られた。これはILBには継目があるため路面テクスチャが連続でないことに起因すると考えられる。なお、ILB(路肩)についてはMTM[®]による測定を省略したため図中に示していない。

(2) 放射線測定

放射線量の測定には、エネルギー補償シンチレーションサーバイメーターTCS-172 BとGMサーバイメーターTGS-146 B(ともに日立アロカメディカル社製)を使用した。

測定方法は、線量当量率、計数率、いずれも時定数30秒にて、測定開始から120秒の経過時間を経て計測した値を求めた。周囲からの放射線の影響を取り除くため鉛遮蔽体(キャリアカート付路面計測用遮蔽体EARTHSHIELD[®] Model-R Pb t=15, EARTHSHIELD 社製)を使用し、地表から1 cmでの測定を行った後、バックグラウンド補正を行った。測定頻度は除染作業の前後1回ずつ行い、1工区あたり3点とした。(Fig.1)

TCS-172Bで行った測定からは、γ線の線量当量率(μSv/h)および計数率(cps)を求めた。TGS-146Bを使用した測定では、β線・γ線の計数率(cpm)を求めた。β線計測は、測定面(路面)の乾燥状況によって、変化する場合がある。除染実験を冬期に行ったため、路面が乾燥しにくく、β線が減衰する可能性が懸念された。路面乾燥状況によって計数率にばらつきが生じた場合に備えて、γ線のみの計数率にはなるものの、TCS-

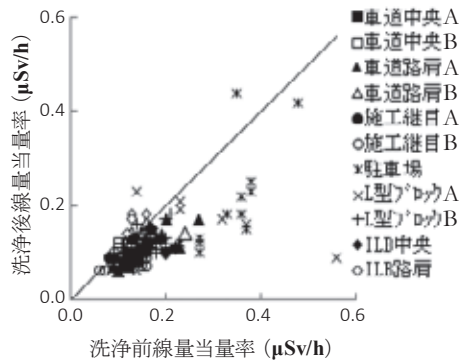


Fig.3 洗浄前後のγ線線量当量率の関係

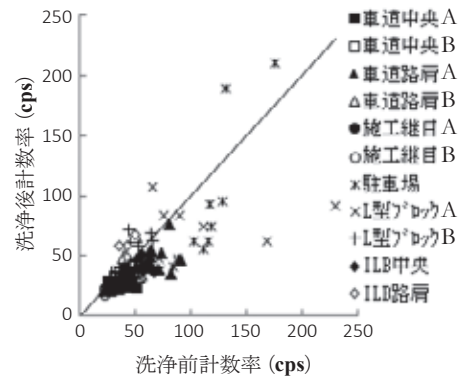


Fig.4 洗浄前後のγ線計数率の関係

172 Bによる計数率も測定した。

経過時間中に値が安定しない場合は、6回の測定値の平均値を取った。鉛遮蔽体によりバックグラウンドの影響を受けず、測定対象面を、ピンポイントかつ安定して測定ができていたことが確認され、変動係数は10%未満であった。

洗浄前と洗浄後 ($n = 1 \sim 4$) のγ線線量当量率の関係を Fig.3 に示した。図中の直線は縦軸と横軸を1:1に区分し、この直線より下部エリアのデータは洗浄後の係数値が洗浄前を下回ることを意味し、直線からの距離が大きいほど低減率が高い。洗浄前のγ線線量当量率は0.1～0.6 $\mu\text{Sv/h}$ であり、駐車場とL型側溝が比較的高い数値を示した。概ね洗浄による低減効果は認められ、特により平滑な路面性状を有するL型側溝と駐車場がより高い低減率を示す傾向にある。一方、路線Bの車道中央部（以下、車道中央B）、車道路肩BとL型側溝BとILB(路肩)において洗浄後に測定値の上昇を示した。ILBの汚染は舗装表面だけでなく、汚染物質が目地部に深く入り込んでいる。特に路肩部は排水勾配による汚染物が蓄積されやすいと考えられる。高圧水洗浄・吸引により汚染物質が洗い出されるものの、吸引効果は舗装表面より低く、

汚染物質を回収しきれず、その一部が表面近くに残留したために洗浄後の測定値が上昇したものと考えられる。

洗浄前後のγ線計数率の関係を Fig.4 に示した。測定対象がγ線であるため Fig.3 と概ね同様の傾向を示した。本実験においては初期値の測定の数日後に洗浄実験を実施したため、車両通行や気象条件の変化により汚染状況の変化があったものと考えられる。

洗浄前後の $\beta \cdot \gamma$ 線計数率の関係を Fig.5 に示した。洗浄前の測定値は、γ線のみでの測定結果と異なり、比較的粗い路面性状を持つ車道路肩が駐車場とともに高い洗浄前計数率を示した。また、γ線のみでの計測よりも多くの点で洗浄後の測定値の上昇が見られた。環境省による除染実証事業において、舗装面では農地やグラウンドなどの土面に比較し、放射性セシウムがごく表面に近いところに偏在しているため、固体中の飛程が短いβ線の寄与が表面密度に顕著に現れるとされており¹⁾、また、β線の計測において水分の影響が知られている⁵⁾。実験が冬季であり気温が低いこと、洗浄前測定の数日後に洗浄実験を実施したこと、および測定した2路線の日照条件が異なることから、表面上乾燥しているように見える路面でも、舗装内

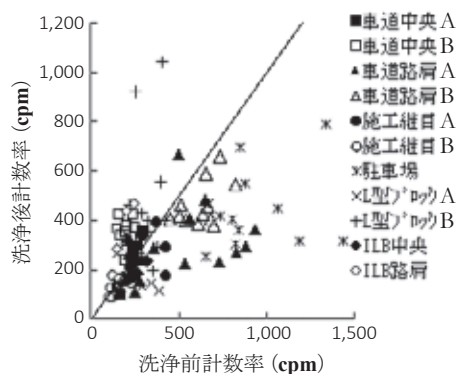


Fig.5 洗浄前後のβ・γ線計数率の関係

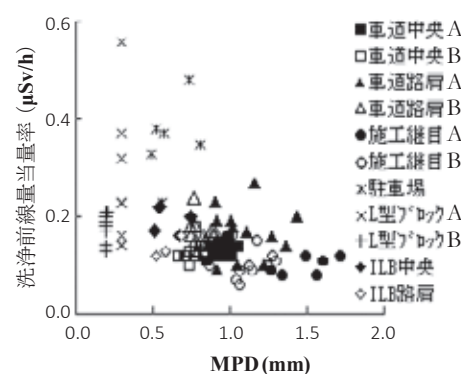


Fig.6 洗浄前のγ線線量当量率とMPDの関係

部の湿潤状態が異なっている可能性が高い。これにより β 線測定値にばらつきが生じたため、洗浄後の $\beta \cdot \gamma$ 線計数率が高くなる点が多くなったと考えられる。

洗浄前の γ 線線量当量率と路面テクスチャの関係を Fig.6 に示した。

MPD の低い舗装は MPD のばらつきが小さいが、線量当量率のばらつきが大きくなる傾向を示した。一方、MPD の高い舗装は MPD のばらつきが大きい、線量当量率のばらつきが小さくなる傾向を示した。L 型側溝は道路表面排水の排水設備として使用されているため、汚染物質が滞留しやすく、また滞留状況によって線量当量率がばらつくと考えられる。また、二次製品であるため表面性状が均一であり、車両等の走行による損傷がないことから路面テクスチャのばらつきが小さいと考えられる。同様に ILB も二次製品であるため MPD のばらつきが小さいが、洗浄前線量当量率のばらつきは比較的小さい。駐車場は比較的洗浄前線量当量率のばらつきが大きくなった。これは駐車区画内の勾配に起因すると考えられる。

車道中央、路肩、施工継目は MPD 値が高く、ばらつきも大きい結果となった。アスファルト舗装は骨材が路面に露出するため路面の凹凸が大きいことによる。また、路肩における洗浄前線量当量率は車道中央、施工継目より大きくなる傾向を示している。これは道路表面排水が路肩に向かって流れるよう勾配が与えられているため、汚染物質が蓄積しやすいためと考えられる。

なお、今後の解析において、洗浄後の計測が洗浄前を上回るデータは除外し、除外されるデータが最も少ない線量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$) について議論することとした。

(3) 洗浄効果の路面テクスチャ依存性

洗浄効果の路面テクスチャ依存性の評価は以下の手順で評価した。

①各試験工区で得られた洗浄前後の測定値から次式により低減率を求めた。

$$E_n = \frac{S_0 - S_n}{S_0} \times 100 \quad \dots\dots\dots \text{eq.1}$$

E_n : n 回洗浄後の低減率 (%)

S_n : n 回洗浄後の線量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)

S_0 : 洗浄前 ($n=0$) の線量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)

②低減率 (%) と洗浄回数 (n) のプロットから一次回帰式および相関係数を求めた。

③一次回帰式の傾きと MPD をプロットし、その一次回帰式および相関係数を求め、その傾きから洗浄効果の路面粗さ依存性を評価した。

ここで相関性の評価はピアソンの積率相関係数の解釈⁶⁾に基づいた。(Table 4)

低減率と洗浄回数の関係の一例を Fig.7 に示した。低減率

Table 4 ピアソンの積率相関係数の解釈

解 釈	相関係数の絶対値 r
ほとんど相関性がない	0.0 ~ 0.2
やや相関性がある	0.2 ~ 0.4
かなり相関性がある	0.4 ~ 0.7
強い相関性がある	0.7 ~ 1.0

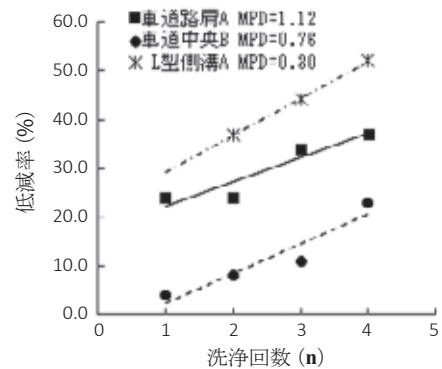


Fig.7 γ 線線量当量低減率と洗浄回数の関係 (例)

Table 5 一次回帰式の傾き、相関係数、MPD

工 区 名	傾 き	r	MPD
車道中央 A	0.049	0.89	0.95
車道中央 B	0.062	0.95	0.76
車道路肩 A	0.083	0.91	1.12
車道路肩 B	-0.013	0.15	0.84
施工継目 A	0.068	1	1.49
施工継目 B	0.038	0.71	1.11
駐 車 場	0.045	0.58	0.62
L 型側溝 A	0.075	0.99	0.3
L 型側溝 B	0.066	0.85	0.21
ILB (中央)	0.102	0.73	0.62

および MPD は各工区の平均値である。MPD が低いものほど、すなわち路面性状が平坦なものほど近似直線の傾きが大きくなる傾向が見られた。同様に各データのプロットから得られた一次回帰式の傾き、相関係数、MPD (各路線の平均値) を Table 5 に示した。一次回帰式の傾きは、各路面における 1 回の洗浄当りの低減率に相当し、傾きの大きいものほど高圧水洗浄による除染効果が高いと考えられる。道路路肩 B を除いて、洗浄回数と低減率の関係にピアソンの積率相関係数の解釈における「かなり～強い」相関性が認められた。また、施工継目 A では測定区間が短く、洗浄回数 (n) が 2 回までの測定となったことから、二点プロットであるため $r=1$ となった。

Table 5 に示した一次回帰式の傾きと MPD の関係を Fig.8

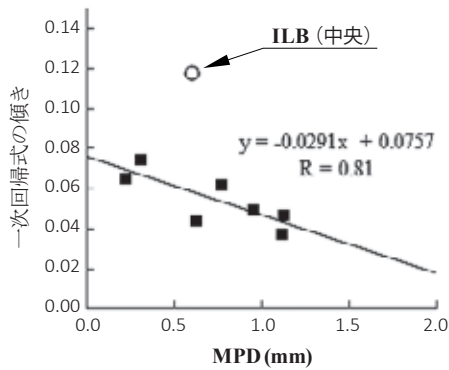


Fig.8 一次回帰式傾きと MPD の関係

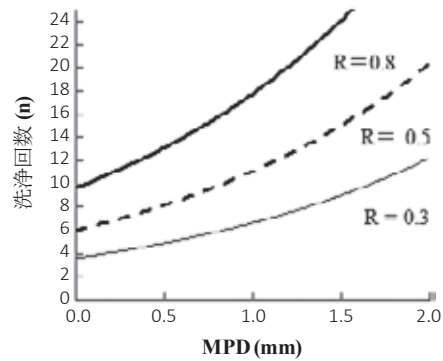


Fig.9 目標低減率を得るための洗浄回数と MPD の関係

に示した。ここでは相関係数の低い道路路肩 B およびデータ数の少ない施工継目 A のデータは除外した。また、ILB(中央)の傾きが他のデータと比較して突出したことから、ILB(中央)を除くデータを用いて一次回帰式を求めた。ILB は多孔質体であるため、他の舗装と異なる特性を示すと考えられる。

一次回帰式の傾きと MPD の間に負の相関が認められ、路面のキメが細かいものほど高圧水洗浄による除染効果が高く、路面が粗いものほど除染効果が低いことがわかる。この原因として次の要因が考えられる。

- ① 表面的には同一面積を有する路面であっても、路面テクスチャの違いにより表面積が大きく異なる。
- ② 路面の凹凸が大きい場合、高圧水の照射面に陰影が生じ、洗浄にムラができる。
- ③ また、路面の凹凸部もしくは細孔部に汚染物質が入り込み、高圧水で除去しにくい状態となっている。

要因①については洗浄回数を増やすこと、要因②については洗浄方向を変える、もしくは噴射装置の改良により改善の余地があると考えられる。一方、要因③については高圧水洗浄の原理的限界であると考えられる。

また、Fig.8 の縦軸は各路面における 1 回の洗浄当りの低減率を示していることから、Fig.8 における一次回帰式より洗浄対象路面の MPD に応じた所要洗浄回数を推定することができると考えられる。つまり、目標とする低減率を R 、それに要する洗浄回数を N とすると、Fig.8 の近似式から次式が得られる。

$$N = \frac{R}{-0.0291x + 0.0757} \quad \text{eq.2}$$

R : 目標低減率

N : 目標低減率を達成するための洗浄回数

x : MPD (mm)

例えば、目標低減率を 0.3、0.5、0.8 とした場合、MPD と所

要洗浄回数の関係は Fig.9 のようになる。すなわち、現状の γ 線線量当量率と洗浄路面のマイクロテクスチャを測定することで、目標とする低減率を達成するための所要洗浄回数が推定可能である。除染事業において路面洗浄の占める面積比は相当に大きいと考えられることから、事前に洗浄回数を推定することは、効率的な除染計画を策定するために有効な方法と考えられる。

4. まとめ

道路の除染作業に用いる高圧水洗浄技術について、その洗浄効果と路面テクスチャの関係を検証した結果、次のような知見が得られた。

- ① MTM[®] による SMTD と CTM による MPD の間には強い相関関係があり、除染前の路面テクスチャの評価にあたっては、現場の条件によっていずれかを選択できることが分かった。
- ② 路面テクスチャと除染による表面線量の低減率には相関があり、除染前の路面テクスチャが大きいほど洗浄 1 回あたりの低減率が低下することから、洗浄回数を多くする必要があることが示唆された。
- ③ 路面テクスチャと洗浄 1 回当たりの低減率の関係から、目標とする低減率を達成するための洗浄回数を推定可能であることが示された。これにより、除染事業において大面積を占める路面のより効率的な除染計画が策定可能と考えられる。

5. おわりに

高圧水洗浄工法は、切削工法と比較して発生廃棄物量が少ないという利点を有する。除染作業の最大の問題点のひとつに除染廃棄物の最終処分地確保が挙げられ、発生廃棄物量が少ない高圧水洗浄工法は総合的に有効な除染工法であると考えられる。また、平成 25 年 (2013 年) 9 月末までの福島県市町村除染実施区域の道路の除染は 30 % 程度であり⁷⁾、他

の公共施設等の除染と比較して進捗が遅い状況である。

高圧水洗浄工法を用いた舗装路面の除染作業は、路面の粗さに着目した除染計画により効率的な作業が可能になると考えられる。

本研究が今後の除染作業の効率化の一助となれば幸である。

参 考 文 献

- 1) 環境省除染チーム：国及び地方自治体がこれまでに実施した除染事業における除染手法の効果について。(http://josen.env.go.jp/material/pdf/effects.pdf 2013/3 閲覧)
- 2) 安部裕也、山本賢二、斉藤和夫、山之口浩：路面のすべり抵抗とテクスチャーの関係に関する研究。舗装、**34-11**、3-8 (1999)
- 3) 井原務、井上武美：路面テクスチャとタイヤ／路面騒音に関する検討。土木学会舗装工学論文集、**6**、235-240 (2001)
- 4) 日本道路協会：S022 舗装路面の粗さ測定方法。pp.104 - 116、「舗装調査・試験法便覧〔第1分冊〕」。日本道路協会編集、日本道路協会、東京 (2007)
- 5) 環境省：第1編 汚染重点調査地域内における環境汚染状況の調査測定方法に係るガイドライン。pp.1-25、「除染関係ガイドライン第2版」(2013)
- 6) 前野昌弘、三國彰：3章 対応するデータの関係を読み取る〔相関〕、**85**、「図解でわかる 統計解析」。日本実業出版社、東京 (2000)
- 7) 環境省除染情報サイト、除染実施区域の概要・進捗。(http://josen.env.go.jp/zone/index.html 2013/12 閲覧)

2013 年 12 月 24 日受付

2014 年 3 月 7 日受理

和 文 要 約

環境省除染技術実証事業の結果、路面除染技術の中で高圧水洗浄は他の工法と比較して効果のばらつきが大きいことが明らかとなった。本研究は、その要因は路面のマイクロテクスチャーの違いに由来すると仮説し、異なる種類の路面において高圧水洗浄を実施し、路面のマイクロテクスチャーと洗浄効率の関係を検証した。洗浄回数と放射線量低減率に正の相関性が認められ、その一次回帰式の傾き（すなわち、洗浄一回当りの放射線低減率）は路面のマイクロテクスチャー増大に伴い減少する傾向を示した。その傾きと路面のマイクロテクスチャーの関係から、目標とする放射線低減率を達成するために必要な洗浄回数を推定する方法を提案した。

