

写真測量技術を用いた舗装ひび割れ部欠損量の定量的評価手法に関する一検討

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒地道路保全チーム ○松本 第佑
国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒地道路保全チーム 丸山 記美雄
国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒地道路保全チーム 星 卓見

積雪寒冷地において舗装に発生したひび割れは、水の浸入や凍結融解作用などにより欠損が拡大しポットホールのような損傷に進展する。ひび割れ部の欠損抑制対策に Fog Seal 工法があるが、その効果を定量的に評価する手法は確立したものがない。そこで本検討では一般国道235号厚真町を対象に、写真測量技術を用いて作成した舗装の3Dモデルからひび割れの欠損量を取得し、Fog Seal の効果について検討した結果を報告する。

キーワード：写真測量、ひび割れ部欠損量、Fog Seal、SfM

1. はじめに

積雪寒冷地において舗装路面に発生したひび割れは、融解期において融雪水等の水が浸入し、浸入した水が凍結融解を繰り返すことで、ひび割れ部付近のアスファルト混合物の欠損（角かけ）やアスファルト混合物層間のはく離を引き起こす。これらの損傷が進行すると、写真-1のように北海道をはじめとする積雪寒冷地において春先に多く見られるポットホールに進展し、舗装寿命の低下や走行安全性の低下が生じる。そのため、舗装路面に発生したひび割れのさらなる損傷を抑制するために、ひび割れ部からの水の浸入を防ぐことが重要である。

筆者らは、ひび割れ部からの水の浸入を防ぎ、ひび割れ部の欠損を抑制する目的で、表面処理工法の一つである Fog Seal 工法についてその効果を検証している。Fog Seal 工法によって、既設のアスファルト舗装に発生したひび割れや空隙をアスファルト乳剤で封かんすることで、ひび割れ部からの水の浸入を防ぎ、アスファルト舗装路面の劣化やひび割れ部付近の欠損等を抑制することを狙いとしている。予防的維持工法として、ひび割れが軽微なうちに使用することが有効であり、舗装機能の回復および延命効果が期待できる¹⁾。しかし、Fog Seal による効果をひび割れ部欠損量から定量的に評価する手法は確立されたものがない。

そのため本検討では、写真測量技術を用いて3D舗装路面データを作成し、ひび割れ部欠損断面積等のひび割れ部欠損量を測定するとともに、これらのひび割れ部欠損量の経時的な変化から Fog Seal による欠損進行抑制効果の評価の可否について検討することを目的とする。

2. 検討方法

本検討では、2019年10月に Fog Seal を散布した国道235号厚真町を対象にひび割れ部欠損量を計測した。Fog Seal 散布からの供用期間について表-1に示す。計測は、Fog Seal を散布してから2冬経過後に行った2021年の既往の計測結果²⁾に加えて、3冬経過後の2022年に行った。



写真-1 舗装に発生したポットホール（札幌市内）

表-1 Fog Seal 散布からの供用期間

時期	経過	計測
2019年10月	Fog Seal 散布	—
2020年10月	1冬経過	—
2021年12月	2冬経過	○
2022年10月	3冬経過	○

本検討の計測方法は、写真測量技術を用いて3D舗装路面データを作成し、ひび割れ部欠損量を測定した。本検討において3D舗装路面データを作成するのに用いた SfM (Structure from Motion) 処理ソフトは、「Agisoft Metashape Professional 1.6.5」(以下、Metashapeとする)とした。

SfMとは、異なる位置から撮影した複数の写真から点群を構築し、3Dモデル(メッシュ)や数値標高モデル(Digital Elevation Model: DEM)、オルソ画像などを作成することができる技術である³⁾。ソフトウェアは、撮影した写真の位置とカメラの角度を推定し、写真間の共通な点(特徴点)を繰り返し計算によって抽出する写真測量における手法を用いることで、これらのモデルを構築している。

(1) 撮影方法

はじめに、舗装路面に発生したひび割れを複数選定し、ひび割れを撮影した。撮影したひび割れは、表-2に示すとおりフォグシールの散布区間と無散布区間の各キロポスト(KP)付近の車輪走行位置に発生したひび割れを撮影した。撮影では、ミラーレス一眼カメラ「OLYMPUS PEN E-PL10」を使用し、手持ちで撮影を行った。撮影者の腰の高さ(舗装路面から90 cm程度)からオーバーラップ60~80%以上となるように、真上から路面に正対した方向と斜め方向からひび割れを撮影した。また、3D舗装路面データを実寸の縮尺で構築するために、Metashape上で自動検出可能なマーカー(図-1)をL字にカットした木材に貼付し、舗装路面上に配置した(写真-2)。自動検出マーカー間は既知の長さで貼付されており、マーカー間の距離をMetashapeに入力するだけで、3D舗装路面データを実寸の縮尺で構築することができる。なお、自動検出マーカーを用いずに、長さの確かな金尺等のスケールを配置しても3D舗装路面データを構築することができ、2冬経過後の2021年の撮影では金尺を配置して撮影を行った。

(2) 3D舗装路面データの作成

撮影した写真群を基に、Metashapeで3D舗装路面データを作成した。Metashape上での処理手順を図-2に示す。本検討は、撮影範囲が狭い領域における計測のため、撮影した写真の緯度経度情報や測量における基準点等を参照しないローカル座標系上でモデルを構築した。モデルを構築し、自動検出マーカーを用いてマーカーを設置後、マーカー間の距離を入力し、実寸の縮尺に3D舗装路面データを構築した。その後、点群データに基づいてDEM、オルソ画像(正射投影像)を構築した。構築したDEM、高密度点群の一例を図-3、図-4に示す。そして、作成したこれらの3D舗装路面データを用いて、ひび割れ部欠損量を計測した。

表-2 ひび割れ撮影地点の概要

R235 厚真町: 2019年10月散布		KP=11.400~11.650
撮影地点 (8箇所)	無散布区間 (KP=11.500~11.550)	KP=11.500 (8), 11.520 (12) 11.525 (9), 11.550 (8)
	散布区間 (KP=11.400~11.500, 11.550~11.650)	KP=11.475 (14), 11.500 (10) 11.550 (8), 11.600 (15)

※KP=11.475は2022年のみ計測 ※()内の数字は断面取得数

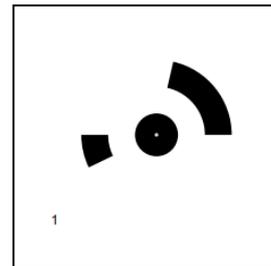


図-1 自動検出マーカーの例(円形14bit)



写真-2 スケールの配置例

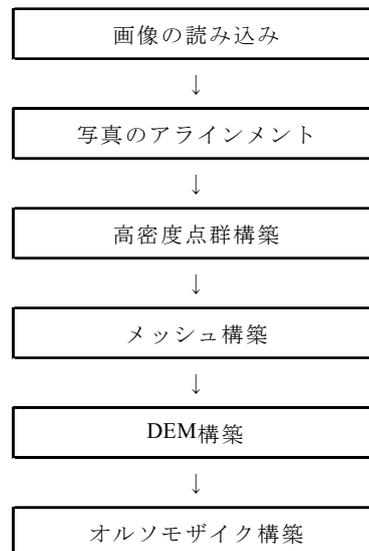


図-2 Metashapeでの処理手順

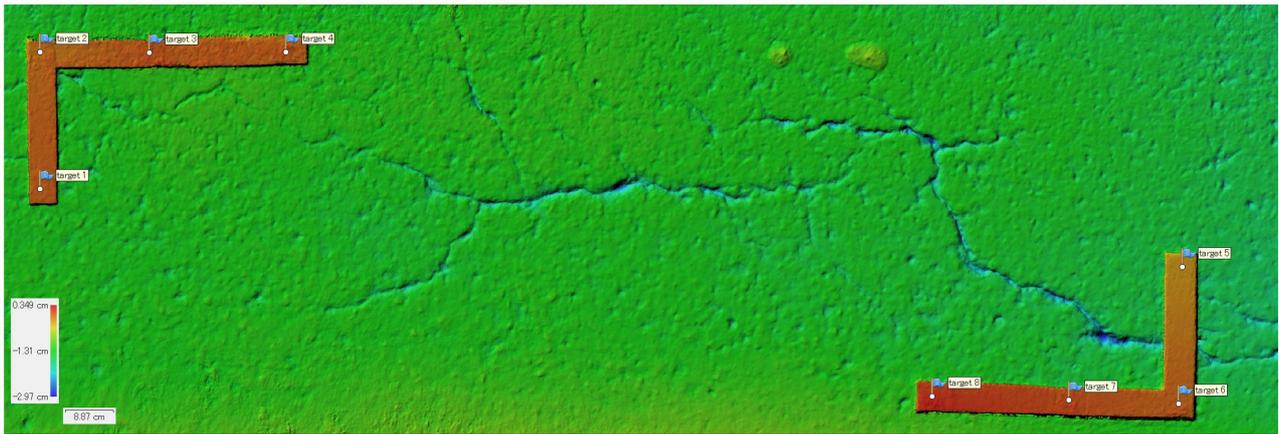


図-3 2022年におけるKP=11.500付近のDEM

(3) ひび割れ欠損部断面の計測

ひび割れ欠損部断面における欠損量として、ひび割れ欠損部の上部の幅（以下、上幅とする）、深さ、断面積を計測した。作成したオルソ画像上において、舗装路面に発生したひび割れの凹凸プロファイルを任意の点から10 cm間隔で複数取得した。そして、取得したひび割れ凹凸プロファイルをAutoCADで読み込み、図-5に示すようにひび割れの欠損部上幅および欠損部深さ、欠損断面積を凹凸プロファイルごとに計測した。そして、 Fogシール散布区間と無散布区間における欠損量の違いについて比較検討した。

(4) ひび割れ欠損部体積の計測

既往の計測結果では、ひび割れ欠損部断面の欠損量のみを計測していたが、取得した断面以外の部分におけるひび割れ欠損を定量的に把握するため、2022年の計測では欠損部体積も併せて計測した。欠損部体積の計測では、Agisoft社のフリースタンドアローンソフトウェア「Agisoft Viewer」を用いて計測を行った。Agisoft Viewerは、Metashape等で作成された点群データやタイルモデルデータを表示し、距離や面積、体積を計測することができるソフトウェアである。Agisoft Viewerで欠損部体積を計測するため、Metashape上で作成した3Dモデルからタイルモデルを構築した。そして、構築したタイルモデルデータをAgisoft Viewerに読み込み、体積測定ツールを用いて舗装路面の標高値を基準面とした基準面以下の体積をひび割れ欠損部体積として計測した。

また、写真測量では3Dモデルを作成したい箇所の写真を撮影し3Dモデルを構築しておくことで、過去の時点における距離や面積などの計測が可能であり、本検討では2021年における欠損部体積についても遡って計測した。2021年の構築済みの3Dモデルよりタイルモデルを新たに構築後、2021年におけるひび割れ欠損部体積をAgisoft Viewerで計測し、2022年における欠損部体積と比較検討した。

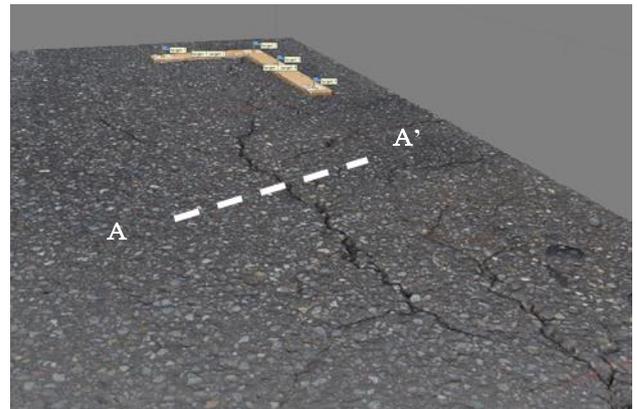


図-4 2022年におけるKP=11.500付近の高密度点群

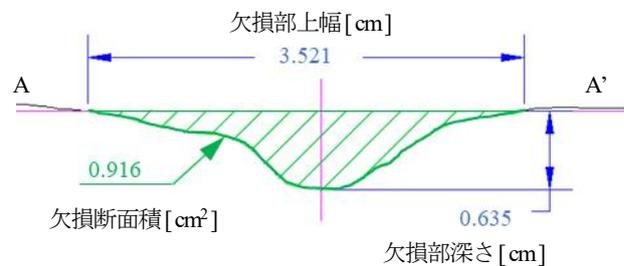


図-5 ひび割れ欠損部断面の計測例

3. 計測結果

(1) ひび割れ欠損部断面の計測結果

Fogシールを散布して2冬経過後の2021年および3冬経過後の2022年におけるひび割れ欠損部上幅および深さ、断面積の計測結果をそれぞれ表-3、表-4に示す。表中には、ひび割れ欠損部上幅、深さ、断面積の平均値・標準偏差 (σ)・最大値・最小値をそれぞれ示している。また、3冬経過後の2022年におけるひび割れ欠損部上幅、深さ、断面積をFogシール散布区間と無散布区間で比較したグラフをそれぞれ図-6、図-7、図-8に示す。グラフには、平均値 $\pm 1\sigma$ の範囲をエラーバーで示している。

表-3 R3年度におけるひび割れ部欠損量の計測結果

区分	KP	フォグシール散布				フォグシール無散布			
		11.475	11.500	11.550	11.600	11.500	11.520	11.525	11.550
欠損部 上幅 [cm]	平均値	—	2.21	1.54	2.05	2.51	3.15	4.79	2.52
	標準偏差	—	1.16	0.49	0.73	0.81	1.18	3.09	1.24
	最大値	—	4.42	2.33	3.40	3.55	4.86	10.71	4.55
	最小値	—	0.85	0.72	1.10	1.39	1.30	2.14	1.45
欠損部 深さ [cm]	平均値	—	0.26	0.21	0.37	0.41	0.74	0.99	0.29
	標準偏差	—	0.14	0.11	0.18	0.14	0.37	0.63	0.10
	最大値	—	0.48	0.40	0.74	0.67	1.26	2.44	0.43
	最小値	—	0.08	0.05	0.15	0.23	0.23	0.41	0.17
欠損 断面積 [cm ²]	平均値	—	0.32	0.19	0.43	0.47	1.25	2.72	0.45
	標準偏差	—	0.32	0.14	0.32	0.21	0.95	3.49	0.38
	最大値	—	1.01	0.48	1.26	0.83	2.52	10.81	1.27
	最小値	—	0.05	0.02	0.10	0.21	0.16	0.45	0.13

図-6より、2022年における欠損部上幅は、フォグシール無散布区間では平均値が2.5 cm以上であるのに対し、フォグシール散布区間では2.0 cm程度であり、フォグシールを散布している区間の方が全体的に小さい結果となった。

図-7より、欠損部深さについても、フォグシールを散布している区間の方が全体的に欠損の小さい結果であったが、フォグシール散布の有無に関わらず数mm程度の値であり、実際の現場の値より浅く計測されている可能性が考えられる。この理由として、ひび割れ欠損部の奥まで光が届いておらず断面形状がはっきりしなかったことで深さ方向に対して浅く3Dモデルが構築された可能性等が考えられる。

図-8より、欠損断面積については、フォグシール散布区間では平均して0.5 cm²程度以下であるのに対し、フォグシール無散布区間では1.0 cm²を超える箇所が多く見られた結果となった。

また、いずれのひび割れ部欠損量の標準偏差もフォグシールを散布していない区間と比べて散布している区間の方が小さい傾向にあり、フォグシールによるひび割れ欠損のばらつきを抑えられていることがわかる。

よって、フォグシール無散布区間と比較して散布区間の方がひび割れ部の断面欠損を抑えられている傾向があることがわかる。

一方、表-3、表-4より、2021年と2022年のひび割れ部欠損量を比較すると、2冬経過から3冬経過の1年にかけて、いずれの工区においてもひび割れ部欠損量は微少な増加もしくはほとんど変化の見られない結果となった。このことから、本検討において撮影したひび割れに対しては、フォグシールの有無にかかわらず供用によってひび割れ部の欠損が大きく進行しなかったことがわかる。しかし、フォグシール散布後2冬経過から3冬経過の1年間に於いてのみ欠損量の変化がなかった可能性も考えられるため、ひび割れ部の断面欠損量の変化について継続的に調査を行う必要がある。

表-4 R4年度におけるひび割れ部欠損量の計測結果

区分	KP	フォグシール散布				フォグシール無散布			
		11.475	11.500	11.550	11.600	11.500	11.520	11.525	11.550
欠損部 上幅 [cm]	平均値	1.43	2.17	1.71	2.32	2.59	3.50	5.92	2.85
	標準偏差	0.39	1.12	0.71	0.73	0.79	1.13	2.91	1.25
	最大値	2.07	4.80	3.03	3.52	3.85	5.69	10.47	4.53
	最小値	0.68	1.06	0.68	1.26	1.51	1.95	2.72	1.38
欠損部 深さ [cm]	平均値	0.47	0.26	0.28	0.45	0.44	0.92	1.34	0.42
	標準偏差	0.23	0.16	0.21	0.20	0.13	0.40	0.70	0.11
	最大値	0.86	0.56	0.62	0.78	0.67	1.50	2.43	0.55
	最小値	0.16	0.07	0.05	0.20	0.28	0.35	0.57	0.20
欠損 断面積 [cm ²]	平均値	0.38	0.30	0.26	0.55	0.53	1.64	4.35	0.61
	標準偏差	0.23	0.35	0.24	0.34	0.28	1.08	4.66	0.38
	最大値	0.76	1.22	0.68	1.12	1.02	2.98	14.34	1.29
	最小値	0.06	0.05	0.02	0.14	0.19	0.32	0.91	0.14

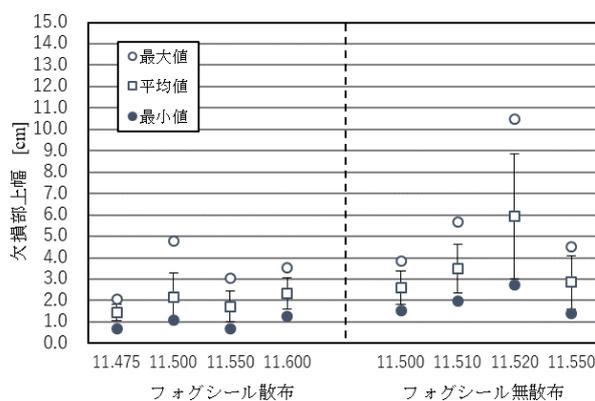


図-6 2022年における欠損部上幅の比較結果

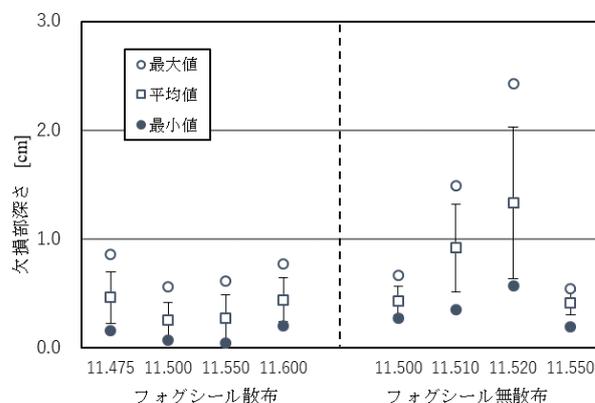


図-7 2022年における欠損部深さの比較結果

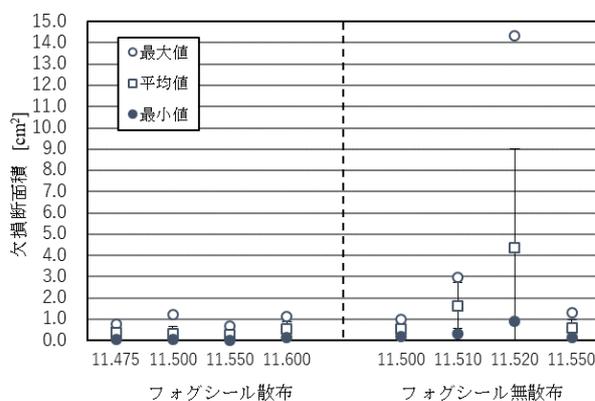


図-8 2022年における欠損断面積の比較結果

表-5 欠損部体積およびひび割れ延長あたりの欠損部体積の計測結果

区分	フォグシール散布				フォグシール無散布				
	KP	11.475	11.500	11.550	11.600	11.500	11.510	11.520	11.550
欠損部体積 [cm ³]	2021	—	51	95	82	174	151	274	95
	2022	292	137	314	145	347	259	1124	105
	増加量	—	86	219	63	173	108	850	10
ひび割れ延長 [cm]	2021	—	170	208	178	228	169	125	106
	2022	244	171	225	184	218	167	130	95
欠損部体積 ひび割れ延長 [cm ³ /cm]	2021	—	0.30	0.46	0.46	0.76	0.89	2.19	0.90
	2022	1.20	0.80	1.40	0.79	1.59	1.55	8.65	1.11
	増加量	—	0.50	0.94	0.33	0.83	0.66	6.46	0.21

(2) ひび割れ欠損部体積の計測結果

ひび割れ欠損部体積の計測結果を表-5に示す。表中には、計測した欠損部体積に加え、単位ひび割れ延長あたりの欠損部体積を算出する目的でAgisoft Viewer上で計測したひび割れ延長を併記しており、欠損部体積をひび割れ延長で除した単位ひび割れ延長あたりの欠損部体積を算出した。また、2021年と2022年における単位ひび割れ延長あたりの欠損部体積をフォグシール散布区間と無散布区間で比較したグラフを図-9に示す。

図-9より、2021年のひび割れ延長あたりの欠損部体積は、フォグシールを散布している区間の方が無散布区間と比べて小さい値となった。2022年においても、フォグシール散布区間のひび割れ延長あたりの欠損部体積は、無散布区間と比べて小さい傾向が見られる。

また、2021年から2022年にかけてのひび割れ延長あたりの欠損部体積は、ひび割れ欠損部上幅、深さ、断面積の結果と比べて欠損量の増加傾向が明確になっていることがわかる。特にフォグシール無散布区間のKP=11.520におけるひび割れ延長あたりの欠損部体積が著しく増加している結果となった。この理由として、計測したひび割れ付近に発生した穴ぼこがパッチングで埋められており(図-10)、目視においてこの部分の周囲の欠損が進行していることを確認していることから、この部分の欠損が結果に影響したと考えられる。

以上の結果より、欠損部上幅、深さ、断面積に加えて欠損部体積を計測することにより、フォグシール無散布区間と比べて散布区間の方がひび割れ欠損を抑えられている傾向があることがわかった。また、2021年から2022年にかけて、欠損部体積の欠損量が増加していることから、ひび割れ欠損部断面では捉えられない部分の欠損を定量的に把握することができる。今回の結果は、ひび割れの欠損量のみに着目して、フォグシールの効果を検討しているため、その他の交通条件や気象条件等を考慮した評価方法をさらに検討していく必要がある。

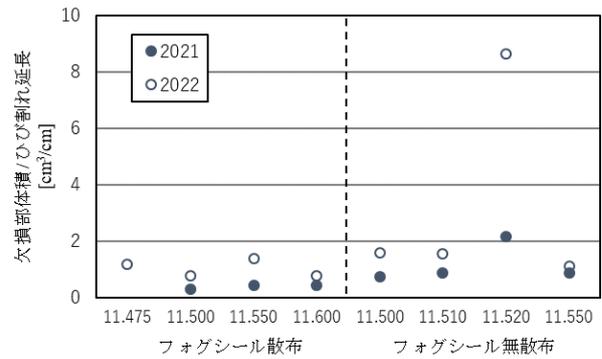


図-9 ひび割れ延長あたりの欠損部体積の比較結果



図-10 KP=11.520におけるパッチング箇所

4. まとめ

本検討では、写真測量技術を用いて3D舗装路面データを作成し、ひび割れ欠損部上幅、深さ、断面積に加えて欠損部体積を測定するとともに、これらの得られたひび割れ部欠損量からフォグシールによる欠損進行抑制効果の評価の可否について検討した。

- 本検討で得られた知見をまとめると以下の通りである。
- (1)写真測量により3D舗装路面データを作成することで、舗装路面に生じたひび割れ部の断面形状および欠損量を把握できることを示した。また、欠損部体積の計測により、ひび割れ欠損部断面では捉えられない欠損を把握できることを示した。
 - (2)フォグシール散布後から2冬経過後および3冬経過後の計測結果より、フォグシールを散布している区間のひび割れ部欠損量は、無散布区間と比べて小さい値を示したことから、写真測量技術を用いてフォグシールによるひび割れの欠損進行抑制効果を定量的に評価できることが示唆された。

以上のことから、今後の検討内容として、供用におけるフォグシール散布区間と無散布区間でのひび割れ部欠損量の変化を捉えるとともに、フォグシールによるひび割れ欠損進行抑制効果を評価する定量的な評価指標を明らかにしていく予定である。また、ひび割れ部欠損量と交通条件や気象条件との関連を明らかにし、フォグシールの適用範囲についても検討していく予定である。

参考文献

- 1)日本道路協会：舗装の維持修繕ガイドブック2013， p.103， 2013
- 2)松本第佑，丸山記美雄，星卓見：写真測量を用いたひび割れ部欠損量の定量的評価手法に関する検討，土木学会第77回年次学術講演会，2022.9
- 3)織田和夫：解説：Structure from Motion (SfM) 第一回 SfMの概要とバンドル調整，写真測量とリモートセンシング，Vol55， No.3， pp.206-209， 2016