

# デジタル画像の画素分解能と コンクリートの視認可能なひびわれ幅に関する検証

Verification of digital image resolution and visible crack width of concrete

木本 啓介\*、松田 浩\*\*

Keisuke KIMOTO and Hiroshi MATSUDA

\*正会員 博士（工学） ㈱計測リサーチコンサルタント（〒732-0029 広島市東区福田 1-665-1）

\*\*正会員 博士（工学） 長崎大学大学院教授 工学研究科（〒852-8521 長崎市文教町 1-14）

橋梁点検における5年に1度の近接目視点検の義務化に伴い、画像を用いた効率的な点検手法の研究開発が行われている。既往研究では画素分解能の1/10倍幅のひびわれが視認可能とされているが、著者の経験上、分解能の1/10倍では視認性が低く、コンクリート表面の状況によっては見落としとなる可能性が高い。そこで、ひびわれのサンプルとして模擬ひびわれシートとひびわれを生じさせたコンクリートパネルを対象として、デジタル一眼レフカメラ等のカメラで画素分解能を変化させつつ撮影画像をPCモニタ上で確認し、性能の異なるカメラ及び画素分解能と視認可能な最小ひびわれ幅の関係性について検証した。

キーワード：デジタル画像、画素分解能、視認、コンクリート構造物、ひびわれ

## 1. 背景と目的

コンクリート構造物においては、目視点検によりひびわれ等の発生状況・進展を把握することやその補修などは、長寿命化にとって極めて重要である。道路橋については、平成26年6月には「道路橋定期点検要領」<sup>1)</sup>が示され、その中で人（点検作業員）が構造物に近接し、点検することが求められている。従来の計測手法としては、人がコンクリート表面を確認し、ひびわれが確認された箇所ではクラックスケールによる幅の計測、コンベックスによる長さの計測、チョーキングしてスケッチによる記録、そして損傷図の作成と点検作業に時間と労力がかかる。人がアクセスできない場合は、高所作業車や足場仮設、ロープアクセスなどで近接し同様の作業を行うため、安全の確保やさらに費用が嵩むこと等の様々な課題を抱えている。遠望から点検する手法としてクラックスケールを内蔵した光波測量機<sup>2)</sup>を用いるものもあり、ダム堤体のひびわれ調査<sup>3)</sup>などに活用されているが、広範囲の計測においては多大な労力を要す。そのような中、目視調査に置き換わる方法として、デジタルカメラで遠隔・非接触で撮影した画像を用いてコンクリート表面の劣化状況を判断する方法が研究・開発<sup>4),5)</sup>され、建築物や橋梁・トンネルといったインフラ構造物の点検<sup>6),7),8)</sup>に活用されている。コンクリート表面を撮影した画像から損傷を視認（人が目で認識すること）・検出（画像解析により自動もしくは半自動で損傷を認識すること）し、損傷程度を評価することは、従来の点検手法と比較し、現場作業の省力化、安定した室内作業による点検漏れの

防止や安全性の向上、複数人が同じ画像を確認することで判定結果の客観性向上など多くの利点を有している（図-1）。しかし、画像を用いた点検では画像処理に要する時間が増大する他、ひびわれや遊離石灰、剥落など色情報で判読できる損傷の把握は可能だが、浮きなどの触診（打音検査）で判断すべき損傷は把握することはできないなどの課題も存在する。また、人が容易にアクセスできる橋梁に対しては、画像を用いた場合の方が高コストとなってしまうことも考えられ、必ずしも画像を用いた点検が効率的な手法であるとは限らない。しかし、画

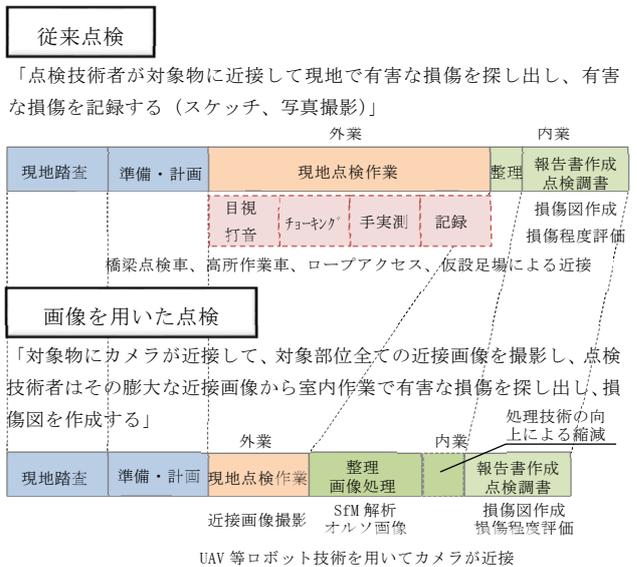


図-1 従来点検と画像を用いた点検の比較

像を用いた点検を1次スクリーニングとして、その後点検技術者が近接点検する面積を限定もしくは低減することも可能であり、橋梁の環境条件や予算によって適切な点検手法を取捨選択し、橋梁点検全体の効率化も期待できる。加えて、画像を用いた点検では、各部位の展開画像や橋梁の3Dモデルなどにより経年的な損傷進展の比較など今後の維持管理の効率化、高度化に向けた付加的な基礎データを蓄積できる重要なメリットを有している。

画像を用いた点検では、撮影画像から非常に微細な色情報であるひびわれを判読する必要があり、「コンクリート診断技術'19 [基礎編]<sup>9)</sup>」では、デジタル分解能以下の1pixelに満たない幅を持つひびわれを画像から特定することが可能であるとされ、村井らの検証<sup>10),11),12)</sup>により172万画素(1312×1312)で撮影範囲の1短辺長が約2.5m以下、つまり画素分解能が約2mm/pixelの画像であれば、コンクリート表面の汚れが少ない状態という制約はあるものの0.2mm幅のひびわれを特定できるという結果が出ている。つまり画素分解能の1/10倍幅のひびわれが視認可能ということだが、筆者のこれまでの画像を用いた点検経験上、画素分解能の1/10倍幅のひびわれは視認性が低く、コンクリート表面の汚れなどの状況によっては見落としとなってしまう可能性が高い。また、近年では撮影機構(ミラーの有無、レンズ交換の可否)やセンササイズ、画素数が異なる多くのカメラ機種が販売されており、これらの違いによる視認性の差も存在すると推測される。

そこで、本検証ではセンササイズに主に着目し、センササイズの異なるデジタル一眼レフカメラ2台・ミラーレスカメラ2台の計4台のカメラを用いて、ひびわれのサンプルとして「模擬ひびわれシート」と数種類のひびわれを生じさせた「コンクリートパネル」を対象に撮影距離を変えることで画素分解能を変化させて撮影し、それらの画像からカメラ機種・画素分解能と視認可能な最小ひびわれ幅の関係性を明らかにする検証を行った。画素分解能と視認可能なひびわれ幅の関係性が明らかになることで、画像を用いた点検の適切な計画立案などが可能となる。

## 2. デジタルカメラの仕組み

デジタルカメラはレンズから入った光を素子の集合体であるCCD(Charge Coupled Device)やCMOS(Complementary Metal-Oxide Semiconductor)のイメージセンサ(撮像素子)で受光し、電気信号に変換後、画像処理エンジンにより画像データへと変換され、カメラのディスプレイでの表示やSDカードなどの記録媒体に記録される。記録方式は、圧縮により容量を抑えるJPEGが広く利用されているが、不可逆圧縮のため画質が劣化してしまう。画質を維持するためには容量は大きくなるが、RAWなどで記録することも可能である。

デジタルカメラの性能は、センササイズや素子の数(画素数、ピクセル数)に大きく依存する。一般的には、セ

ンササイズが大きいほどより多くの光情報を取り込むことができ画質が向上し、画素数が多いほど高画素となり分解能は向上する。その他、ダイナミックレンジも重要な要素である。ダイナミックレンジとは一度の撮影でカメラが識別できる明るさの範囲のことを示し、ダイナミックレンジを超えた範囲は「白飛び」や「黒つぶれ」となり階調が失われ、被写体の判読が困難となる。使用しているセンサの性能に依存する部分はあるが、一般的にセンササイズが大きいほどダイナミックレンジが広がり、表現可能な階調の幅が広がる。図-2はダイナミックレンジのイメージを示したものである。現在、販売されているデジタルカメラは、撮影機構(ミラーの有無、レンズ交換の可否)やセンササイズ、画素数の違いによりデジタル一眼レフカメラ、ミラーレスカメラ、コンパクトデジタルカメラなどがある。本検証では画像からコンクリート表面の損傷の視認を目的としており、その中でも特にひびわれは1mm以下の極微細な色情報のため、センササイズが大きく画質の点で有利なデジタル一眼レフカメラとミラーレスカメラを主に用いた。

## 3. 検証方法

### 3.1 撮影対象

以下に示す3種類のターゲットを撮影対象とした。

【模擬ひびわれシート】(図-3、図-4)

コンクリート表面色の差によるひびわれの視認性を検証するため、段階的に灰色の濃さを変えた背景色の上に0.1、0.2、0.3、0.5、0.7、1.0、1.2、1.5、1.7、2.0、3.0mm幅の計11本ひびわれを模した線が配置されたA3横サイズのシートと遠方からの視認性確認のため1.0、2.0、5.0、10.0、20.0、30.0mm幅のひびわれについては別のA3縦サイズのシートを準備した。図-3のシート下部の数値は、RGB値を示す。例えば130と記載されている背景色は、デジタル画像上ではRGB(130, 130, 130)であり、印刷した場合C56 M47 Y44 K0である。

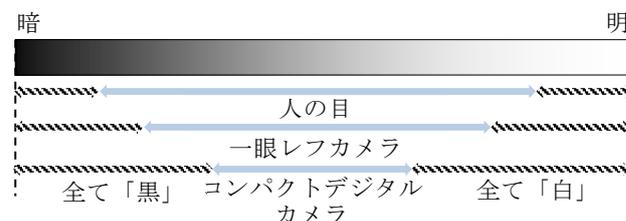


図-2 ダイナミックレンジのイメージ

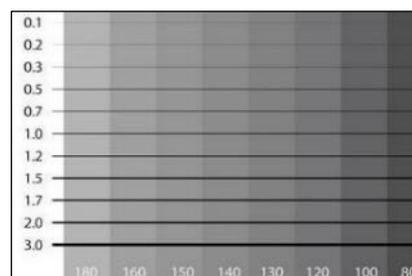


図-3 0.1~3.0mmの模擬ひびわれシート

【模擬ひびわれシート (十字)】 (図-5)

コンクリート表面のひびわれは、一定方向のみに生じることではないため、水平垂直の2方向に0.1、0.2、0.3、0.5、0.7、1.0、1.2、1.5、1.7、2.0、3.0mm幅の模擬ひびわれを配置した A3 サイズのシートを準備した。遠方から撮影し、分解能が低くなった場合に A3 横サイズの模擬ひびわれシートでは、隣接する模擬ひびわれがピクセルに影響する可能性があるため、A3 サイズ1枚に1つのひびわれを十字に配置した。このとき背景色は、RGB (130, 130, 130) を採用した。

【コンクリートパネル】 (図-6)

実際のコンクリート表面に生じたひびわれで検証を行うために、意図的にひびわれを生じさせた 30cm 角のコンクリートパネルを準備した。ひびわれ幅の評価対象箇所には事前にクラックスケールを用いて直接測定した真値幅を明示し、鉛筆で薄く矢印を記載した。評価対象ひびわれ幅は、0.1、0.2、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、1.0、1.4、1.5、3.0mm の計 11 箇所である。

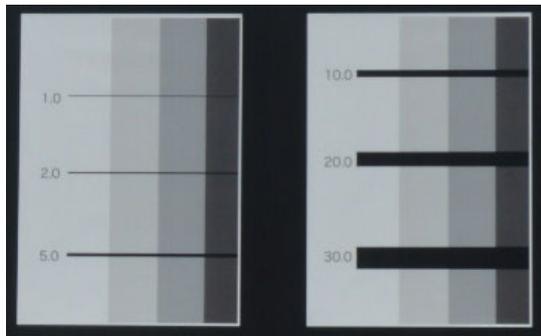


図-4 1.0～30mm の模擬ひびわれシート



図-5 模擬ひびわれシート (十字)



図-6 コンクリートパネル

3.2 使用機材

検証に使用したカメラは、センササイズを考慮し一眼レフカメラ (フルサイズ)、一眼レフカメラ (APS-C)、ミラーレスカメラ (フルサイズ)、ミラーレスカメラ (フォーサーズ) の 4 種類である。表-1 に各カメラの仕様を示す。撮影時に使用したレンズ焦点距離も併せて記す。

3.3 撮影方法

撮影対象とする模擬ひびわれシート、模擬ひびわれシート (十字)、コンクリートパネルをボードに貼り付け配置し、撮影距離を変えることで画素分解能を変化させて撮影した。撮影距離とそのときの各カメラの画素分解能を表-2 に示す。カメラに性能差はあるが、設定は ISO200、ホワイトバランスオート、その他 HDR 等の拡張機能は使用せず、画像フォーマットは JPEG とした。撮影時は、晴天で十分な光量が得られたため、シャッター速度 1/500s のシャッター優先モードで撮影し、f 値は全て 9～16 で

表-1 検証に用いたカメラの仕様

	一眼レフカメラ	一眼レフカメラ
名称	【A】	【B】
イメージ		
センサ	CMOS センサ	CMOS センサ
センササイズ	35.9×24.0mm (フルサイズ)	23.5×15.6mm (APS-C)
画素数	6016×4016 2432 万画素	6000×4000 2410 万画素
大きさ (W×H×D)	約 140.5×113× 78mm	約 135.5×106.5 ×76mm
使用レンズ	AF-S NIKKOR 24- 120mm f/4G ED VR	AI AF Nikkor 24mm f/2.8D
撮影時の焦点距離 (35mm 換算)	24mm (24mm)	24mm (約 35mm)

	ミラーレスカメラ	ミラーレスカメラ
名称	【C】	【D】
イメージ		
センサ	CMOS センサ	CMOS センサ
センササイズ	35.9×24.0mm (フルサイズ)	17.3×13.0mm (フォーサーズ)
画素数	7360×4912 3640 万画素	4592×3448 1600 万画素
大きさ (W×H×D)	約 126.9×94.4× 54.8mm	約 140.5×113× 78mm
使用レンズ	Sonnar T* FE 35mm F2.8 ZA	LUMIX G VARIO 12-32mm/F3.5-5.6
撮影時の焦点距離 (35mm 換算)	35mm (35mm)	12mm (約 24mm)

あった。また、フォーカスは常にボードにオートで調整しフォーカスロックを用いて撮影した。ブレ防止のため撮影時は全てカメラ三脚を使用し、シャッターはレリーズを用いて切った。写真-1 に撮影時の状況を示す。

### 3.4 評価方法

撮影画像からコンクリート表面のひびわれを見つけ出し、デジタルクラックスケールにより幅や長さを計測するためには、まず撮影画像からひびわれを「視認（人の目で認識する）」することが第一段階の作業であり、視認できなければ見落としとなってしまいます。将来的に「視認」のプロセスを省略し画像解析やAI等により「自動検出」することが可能となることが予期されるが、本検証においては「視認」のプロセスは必要と考えている。

評価方法は、各距離で撮影した画像を PC モニタ上で拡大し、模擬ひびわれおよびコンクリートパネルのひびわれが視認できれば「○」、周囲の状況なども加味すれば、視認が可能な場合は「△」、視認不可の場合は「×」とし、整理した。図-7 に評価例とそれぞれの画像のひびわれ上とひびわれ直近のピクセルの RGB 値を示す。この値の差が小さいほどひびわれの視認性が低い。

表-2 撮影距離と各カメラの画素分解能

撮影距離 (m)	画素分解能 (mm/pixel)			
	【A】	【B】	【C】	【D】
1.5	0.37	0.24	0.21	0.47
3	0.75	0.49	0.42	0.94
5	1.24	0.82	0.70	1.57
7	1.74	1.14	0.98	2.20
10	2.49	1.63	1.39	3.14
15	3.73	2.45	2.09	4.71
20	4.97	3.26	2.79	6.28
25	6.22	4.08	3.48	7.85
30	7.46	4.90	4.18	9.42
40	9.95	6.53	5.57	12.56
50	12.43	8.16	6.97	15.70
70	17.40	11.42	9.76	21.98
100	24.86	16.32	13.94	31.40
120	29.84	19.58	16.72	37.67



写真-1 撮影状況

## 4. 検証結果

### 4.1 撮影結果

4 種類のカメラで撮影した結果のうち、【A】で撮影したオリジナル画像と模擬ひびわれシートの拡大画像の一例を図-8 および図-9 に示す。距離が離れるにつれ画角内の撮影対象ボードは小さくなり、分解能は低下していくため模擬ひびわれシートの画質は劣化し、模擬ひびわれの視認性は低下している。

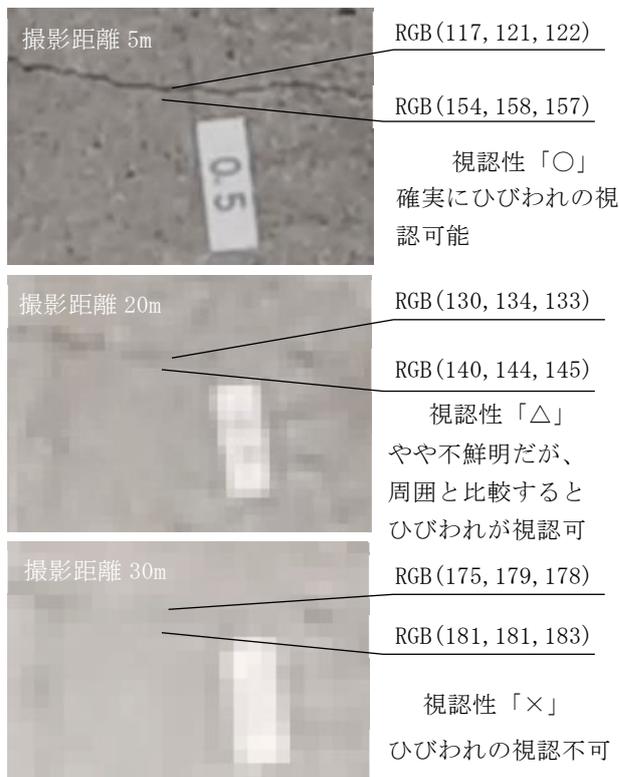


図-7 視認性の評価例

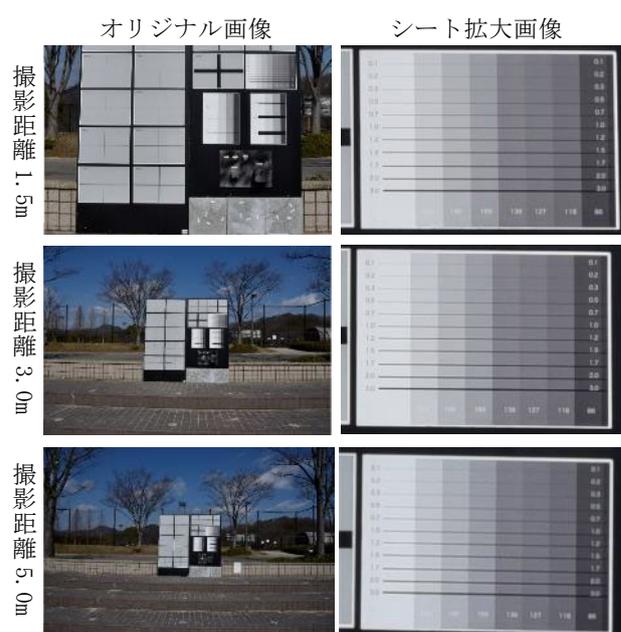


図-8 【A】の撮影結果

デジタル画像の画素分解能とコンクリートの視認可能なひびわれ幅に関する検証

オリジナル画像                      シート拡大画像

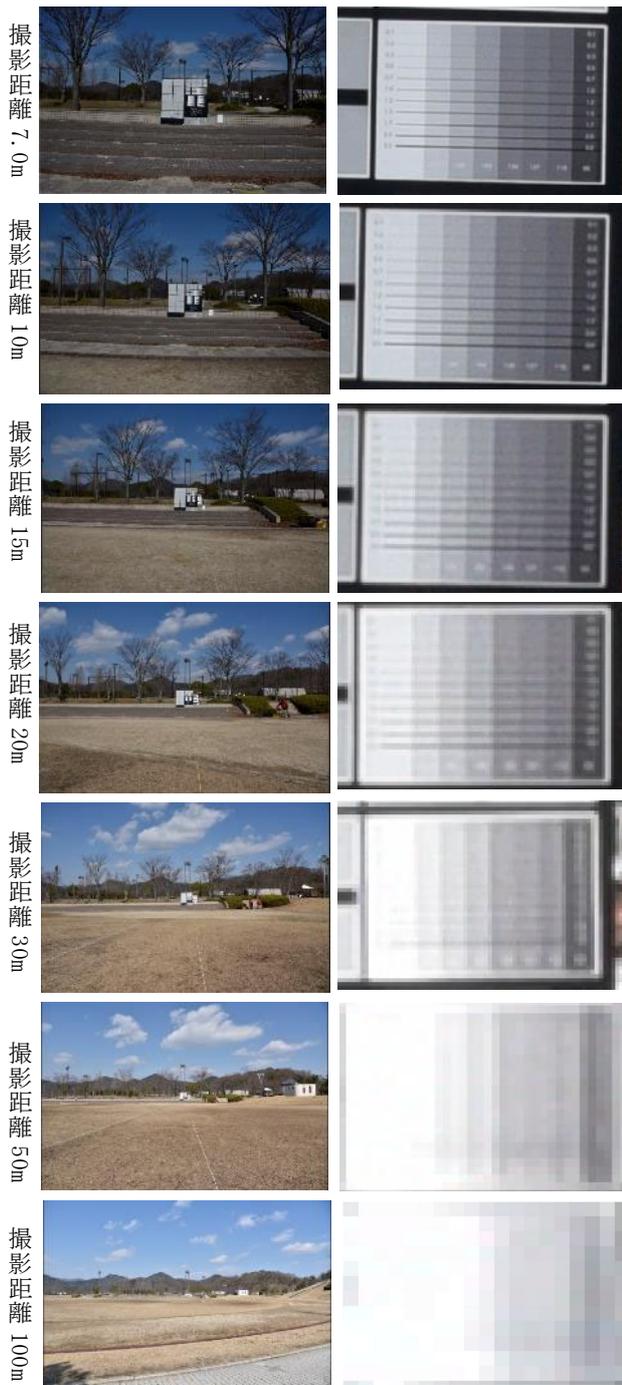


図-9 【A】の撮影結果

4.2 視認性の評価結果

コンクリートパネルおよび模擬ひびわれシートを4種のカメラで撮影した全ての画像をPCモニターで拡大し、評価対象ひびわれの視認性を確認し、計測距離ごとに「○」「△」「×」で評価した。

表-3は、コンクリートパネルを撮影した画像の評価結果を一覧としてまとめたものである。どのカメラも距離が離れる、つまり画素分解能が低下するにつれ視認可能な最小ひびわれ幅は太くなる傾向が見受けられる。また、どのカメラにおいても画素分解能の1/10倍幅のひびわ

表-3 視認性の評価結果 (コンクリートパネル)

**【A】**

撮影距離 (m)	画素分解能 (mm/pixel)	評価対象ひびわれ幅 (mm)										視認可能な最小ひびわれ幅 (mm)	最小ひびわれ幅 / 画素分解能
		0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	1.4	1.5		
1.5	0.37	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.27
3	0.75	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.2	0.27
5	1.24	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.2	0.16
7	1.74	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	0.4	0.23
10	2.49	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	0.6	0.24
15	3.73	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	0.7	0.19
20	4.97	×	×	×	×	×	△	○	○	○	○	0.8	0.16
25	6.22	×	×	×	×	×	×	△	△	○	○	1.5	0.24
30	7.46	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	1.5	0.20
40	9.95	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	3	0.30
50	12.43	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	△	-
70	17.40	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-
100	24.86	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-
120	29.84	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-

**【B】**

撮影距離 (m)	画素分解能 (mm/pixel)	評価対象ひびわれ幅 (mm)										視認可能な最小ひびわれ幅 (mm)	最小ひびわれ幅 / 画素分解能
		0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	1.4	1.5		
1.5	0.24	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.42
3	0.49	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.2	0.41
5	0.82	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.2	0.24
7	1.14	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	0.4	0.35
10	1.83	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	0.5	0.31
15	2.45	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	0.6	0.24
20	3.28	×	×	×	×	×	△	○	○	○	○	0.8	0.25
25	4.08	×	×	×	×	×	×	△	○	○	○	1	0.25
30	4.90	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	1.5	0.31
40	6.53	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	3	0.46
50	8.16	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	△	-
70	11.42	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-
100	16.32	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-
120	19.58	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-

**【C】**

撮影距離 (m)	画素分解能 (mm/pixel)	評価対象ひびわれ幅 (mm)										視認可能な最小ひびわれ幅 (mm)	最小ひびわれ幅 / 画素分解能
		0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	1.4	1.5		
1.5	0.21	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.48
3	0.42	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.24
5	0.70	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.14
7	0.98	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.2	0.20
10	1.39	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	0.4	0.29
15	2.09	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	0.5	0.24
20	2.79	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	0.6	0.22
25	3.48	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	0.7	0.20
30	4.18	×	×	×	×	×	△	○	○	○	○	0.8	0.19
40	5.57	×	×	×	×	×	×	△	△	○	○	1.4	0.25
50	6.97	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	1.5	0.22
70	9.76	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	3	0.31
100	13.94	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-
120	16.72	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-

**【D】**

撮影距離 (m)	画素分解能 (mm/pixel)	評価対象ひびわれ幅 (mm)										視認可能な最小ひびわれ幅 (mm)	最小ひびわれ幅 / 画素分解能
		0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	1.4	1.5		
1.5	0.47	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.21
3	0.94	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.2	0.21
5	1.57	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	0.5	0.32
7	2.20	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	0.6	0.27
10	3.14	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	0.8	0.25
15	4.71	×	×	×	×	×	△	△	○	○	○	1.4	0.30
20	6.28	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	1.5	0.24
25	7.85	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	3	0.38
30	9.42	×	×	×	×	×	×	×	×	×	△	-	-
40	12.56	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-
50	15.70	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-
70	21.58	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-
100	31.40	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-
120	37.67	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-

れを視認することは困難であり、概ね画素分解能の1/3~1/4倍のひびわれ幅を視認することが可能と言える。なお、「△」は視認不可として評価した。

表-4は、模擬ひびわれシートを撮影した画像の評価結果をまとめたものである。このとき背景色がRGB(130, 130, 130)にある模擬ひびわれを用いて評価した。コンクリートパネルと同様に画素分解能が低下するにつれ視認可能な最小ひびわれ幅は太くなる傾向が見受けられる。また、模擬ひびわれシートの場合、画像上で模擬ひびわれのRGB値の分布が直線的で単調であり背景色との差が明確なため、コンクリートパネルと比較すると視認性が高く、一部画素分解能の1/10倍幅のひびわれも視認できた箇所も存在するが、1/10倍幅のひびわれを視認することが可能と言える結果ではないと考える。概ね画素分解能の1/3~1/5倍のひびわれ幅を視認することが可能と言える。なお、コンクリートパネルと同様に「△」は視認不可として評価した。

表-4 視認性の評価結果（模擬ひびわれシート）

【A】																		
撮影距離 (m)	画素分解能 (mm/pixel)	評価対象ひびわれ幅(mm)										視認可能な 最小ひびわれ幅 (mm)	最小ひびわれ幅 /画素分解能					
		0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0			10.0	20.0	30.0		
1.5	0.37	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.27
3	0.75	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.13
5	1.24	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.08
7	1.74	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.2	0.11
10	2.49	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.3	0.12
15	3.73	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.5	0.13
20	4.97	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.7	0.14
25	6.22	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1.0	0.11
30	7.46	×	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1.5	0.13
40	9.95	×	×	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	2.0	0.15
50	12.43	×	×	×	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	3.0	0.16
70	17.40	×	×	×	×	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	5.0	0.29
100	24.86	×	×	×	×	×	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	10	0.40
120	29.84	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	△	○	○	○	○	20	0.67

【B】																		
撮影距離 (m)	画素分解能 (mm/pixel)	評価対象ひびわれ幅(mm)										視認可能な 最小ひびわれ幅 (mm)	最小ひびわれ幅 /画素分解能					
		0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0			10.0	20.0	30.0		
1.5	0.24	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.42
3	0.49	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.20
5	0.82	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.12
7	1.14	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.09
10	1.83	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.2	0.12
15	2.45	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.3	0.12
20	3.26	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.5	0.15
25	4.08	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.7	0.17
30	4.90	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1.0	0.20
40	6.53	×	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1.5	0.23
50	8.16	×	×	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	2.0	0.25
70	11.42	×	×	×	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	3.0	0.26
100	16.32	×	×	×	×	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	5.0	0.61
120	19.58	×	×	×	×	×	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	10	0.51

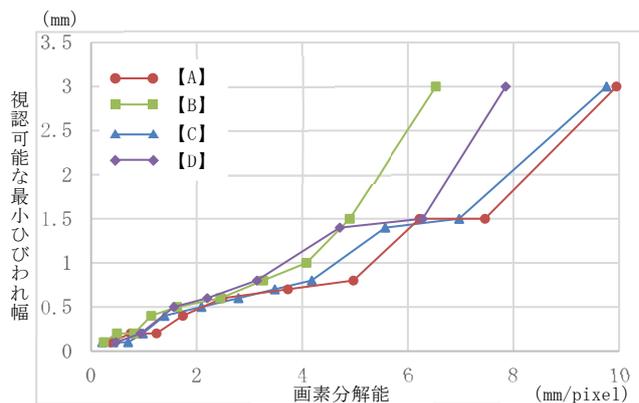
【C】																		
撮影距離 (m)	画素分解能 (mm/pixel)	評価対象ひびわれ幅(mm)										視認可能な 最小ひびわれ幅 (mm)	最小ひびわれ幅 /画素分解能					
		0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0			10.0	20.0	30.0		
1.5	0.21	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.48
3	0.42	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.24
5	0.70	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.14
7	0.98	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.10
10	1.39	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.07
15	2.09	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.2	0.10
20	2.79	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.3	0.11
25	3.48	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.3	0.09
30	4.18	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.5	0.12
40	5.57	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.7	0.13
50	6.97	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1.0	0.14
70	9.76	×	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	2.0	0.20
100	13.94	×	×	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	3.0	0.22
120	16.72	×	×	×	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	5.0	0.30

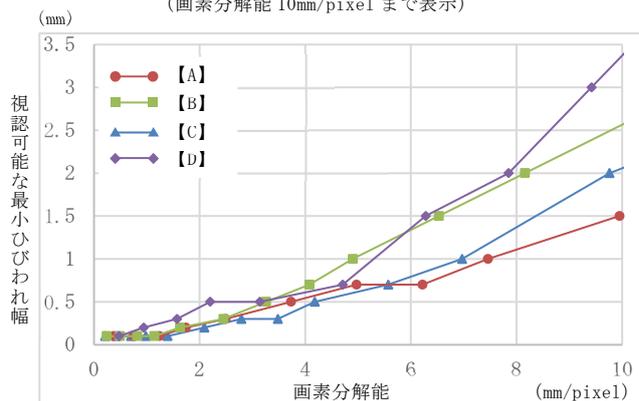
【D】																		
撮影距離 (m)	画素分解能 (mm/pixel)	評価対象ひびわれ幅(mm)										視認可能な 最小ひびわれ幅 (mm)	最小ひびわれ幅 /画素分解能					
		0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0			10.0	20.0	30.0		
1.5	0.47	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.21
3	0.94	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.2	0.21
5	1.57	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.3	0.19
7	2.20	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.5	0.23
10	3.14	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.5	0.16
15	4.71	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.7	0.15
20	6.28	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1.0	0.24
25	7.85	×	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	2.0	0.25
30	9.42	×	×	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	3.0	0.32
40	12.56	×	×	×	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	5.0	0.40
50	15.70	×	×	×	×	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	10	0.64
70	21.98	×	×	×	×	×	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	20	0.45
100	31.40	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	△	○	○	○	○	30	0.54
120	37.67	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	△	○	○	○	50	0.80

4.3 考察

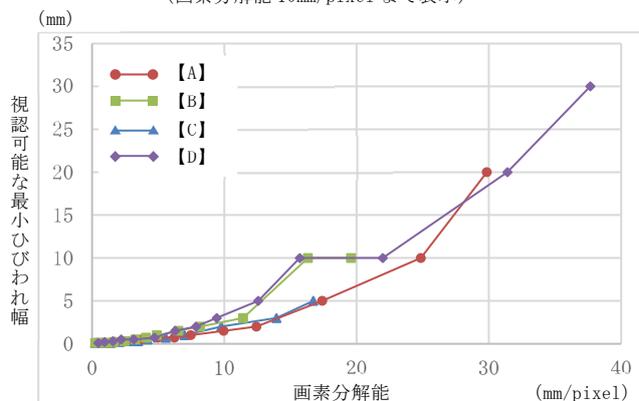
図-10 は前節の表-3 および表-4 の結果より、画素分解能と視認可能な最小ひびわれ幅の関係性をグラフで表したものである。これらのグラフより、画素分解能と視認可能な最小ひびわれ幅には、相関があることや4種のカメラの特性から視認可能な最小ひびわれ幅に違いがあることが分かる。グラフの傾きが小さいほど、同じ画素分解能でもより細かいひびわれを視認できることを示しており、画素分解能1~3mm/pixelではあまり差は見受けられないが(図-11)、低分解能になるほどカメラ毎のバラつきが大きくなる傾向が見受けられる。その中でも【A】と【C】は両者ともグラフの傾きが小さく、画素分解能と視認可能な最小ひびわれ幅の関係性もほぼ同等の傾向を示しており、【B】、【D】の2種に比べ、視認性は優位であると言える。また、同じ画素分解能であってもコンクリートパネルより模擬ひびわれシートの方が視認性が高い結果となっており、模擬ひびわれシートのように背景色が均一で直線的な線のためコントラストが明確に表れたことが原因ではないかと推測する。



グラフ (1) コンクリートパネルを用いた視認性評価 (画素分解能 10mm/pixel まで表示)



グラフ (2) 模擬ひびわれシートを用いた視認性評価 (画素分解能 10mm/pixel まで表示)

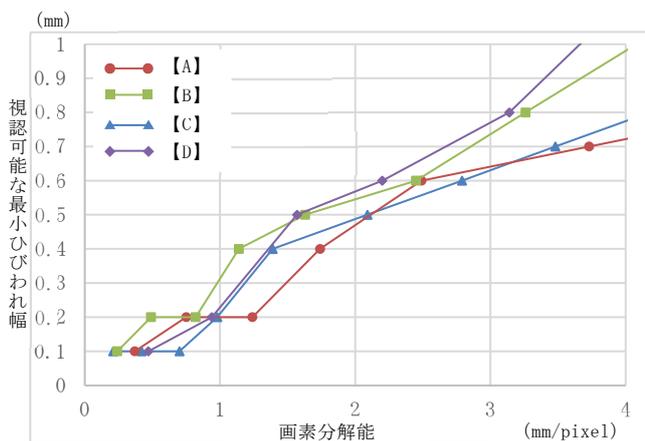


グラフ (3) 模擬ひびわれシートを用いた視認性評価 (画素分解能 40mm/pixel まで表示)

図-10 画素分解能と視認可能な最小ひびわれ幅の関係

当初、搭載されたセンササイズが大きいほどより視認性が高くなると予想していたが、【B】と【D】はセンササイズが大きく異なるもののほぼ同等の視認性評価の結果が得られている。このことからひびわれの視認性にはセンササイズの大きさも重要な要素であるが、センサを構成している素子(ピクセル)の大きさが最も重要な要素ではないかと推測される。各カメラの画素ピッチは計算上、表-5に示す通りとなり、【B】と【D】はほぼ同じ画素ピッチであり、1素子あたりの受光面積が他2機種に比べ小さいことが、視認性がやや低くなった要因と考えられる。

デジタル画像の画素分解能とコンクリートの視認可能なひびわれ幅に関する検証



グラフ (4) コンクリートパネルを用いた視認性評価 (画素分解能 4mm/pixel までを表示)

図-11 画素分解能と視認可能な最小ひびわれ幅の関係性 (画素分解能 4mm/pixel までを拡大表示)

表-5 各カメラの画素ピッチ

カメラ名	【A】	【B】	【C】	【D】
センササイズ	35.9 × 24.0mm	23.5 × 15.6mm	35.9 × 24.0mm	17.3 × 13.0mm
画素数	6016×4016	6000×4000	7360×4912	4592×3448
画素ピッチ (計算上)	5.97 μm	3.92 μm	4.88 μm	3.77 μm

表-3 および表-4 の結果より、最小ひびわれ幅 2mm、画素分解能 5mm/pixel までの結果をプロットし、近似式を表示したグラフを図-12 に示す。赤がコンクリートパネル、青が模擬ひびわれシートを用いて評価したものであり、それぞれ画素分解能 1~3mm/pixel においては、カメラ機種による差異は少ないことからまとめてプロットした。緑の曲線は「デジタル画像によるコンクリート床版劣化判定システムの開発<sup>13)</sup>」(佐々木他, p. 1776, 2003) に示された「図-2 認識可能なひびわれ幅と撮影画角の関係グラフ」を筆者が X 軸を画素分解能に変換したグラフである。(点線は推定である。)

赤と青の直線はプロットした値の 1 次近似式であり、ひびわれ幅 1mm 以下については、緑の曲線よりそれらの近似式が上部にある。PC・RC 構造物の点検で抽出が要求されるひびわれは、0.1mm もしくは 0.2mm 幅以上であり、これらを視認するためには「デジタル画像によるコンクリート床版劣化判定システムの開発<sup>13)</sup>」で示された緑線より上部、つまり高分解能の画像撮影が必要である。図-12 に示す 2 つの 1 次近似式を逆算すると、1mm~1.5mm 幅程度のひびわれを視認するためには、コンクリートパネルを用いた検証結果からは、抽出すべきひびわれ幅の約 4 倍の画素分解能、模擬ひびわれシートを用いた検証結果からは、抽出すべきひびわれ幅の約 5 倍の画素分解能を持つ画像を撮影する必要がある。ただし、本検証で使用したコンクリートパネルは表面の汚れが少なく、模擬ひびわれシートも背景色が均一でひびわれの視認性が

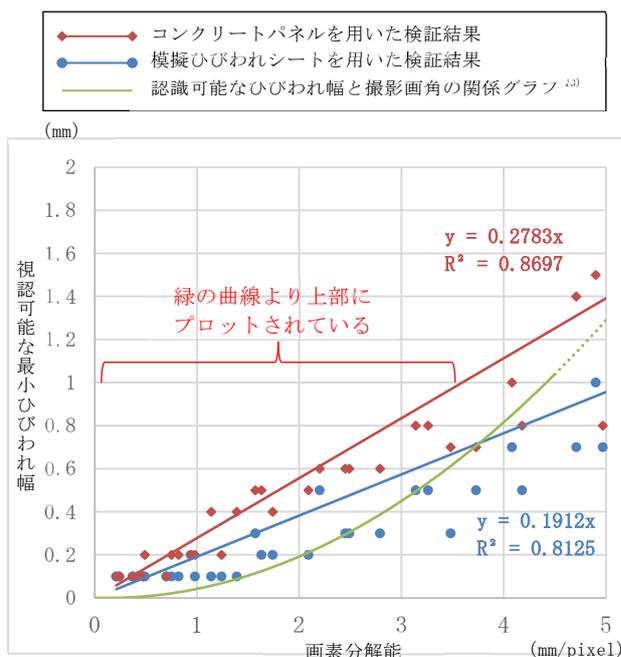


図-12 画素分解能と視認可能な最小ひびわれ幅の関係性 (画素分解能 5mm/pixel までを拡大表示)

高いため、実際にはより確実性を高めるため抽出すべきひびわれ幅の約 3~5 倍の画素分解能を持つ画像の撮影が必要であると言える。

5. まとめ

画素分解能と視認可能な最小ひびわれ幅には明確に相関があることと画素分解能の 1/10 倍幅のひびわれを画像から視認することは困難であることが分かった。また、画素分解能 1~3mm/pixel においては、使用するカメラによる視認性の差異は多少生じているものの、ほぼ同じ傾向を示しているが、画素分解能 4mm/pixel より低分解能になるにつれ差異が顕著に現れており、画素ピッチが小さなカメラの視認性がより低下している。「コンクリート診断技術 ‘19 [基礎編]<sup>9)</sup>」に記載されている検証結果は、使用したカメラの画素ピッチが約 11.85 μm と今回使用した 4 機種より大きく、高画質であったことが、画素分解能の 1/10 幅のひびわれを視認できた要因と推測する。

本検証結果より、画像を用いたコンクリート構造物の点検では、抽出すべきひびわれ幅の約 3~5 倍の画素分解能を持つ画像の撮影が必要と言える。例えば、0.2mm 幅のひびわれの抽出が要求される場合は、0.6~1.0mm/pixel の画素分解能を有する画像が必要となる。このとき、使用するカメラは高い視認性を確保するためにセンササイズが大きく、画素ピッチも大きなものが推奨される。これらを考慮し、対象となるコンクリート表面の状況や撮影環境に応じて適切な画素分解能を設定し、効果的、効率的な撮影計画を立案することが重要である。

## 6. 今後の展望

国土交通省は、2019年2月に「道路橋定期点検要領<sup>1)</sup>」を改定し、運用の留意事項に対応した付録の一般的な注意点の中で、『自らの近接目視によるときと同等の健全性の診断を行うことができると定期点検を行う者が判断した場合には、その他の方法についても近接目視を基本とする範囲と考えてよい』とし、点検に画像を用いることも可能となった。今後はインフラ構造物の長寿命化のための維持管理やモニタリングへのニーズがさらに高まり、橋梁点検の効率化や高度化が図られていくと考えられるが、その中で「画像」を基礎データとして、そこから「損傷を抽出する」という過程は不変であり、画像の価値や重要性は益々高まっていくと予期される。本検証を基礎として、画像の活用による点検の効率化・高度化に向け、継続的に検証を行っていく必要がある。

## 参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領，  
[http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo4\\_1.pdf](http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo4_1.pdf)，2014.6[改訂，2019.2]
- 2) 前田穰，中庭和秀，石澤徹，小山幸則，朝倉俊弘：クラックスケール内蔵光波測量器を用いたひび割れ点検システムの開発と現場適用，土木情報利用技術論文集 16 巻，pp.167-174，2007
- 3) 交久瀬磨衣子，中庭和秀，建山和由：クラックスケール内蔵光波測量機を用いたダム堤体のひびわれ調査について，土木学会第 65 回年次学術講演会，VI-153，2010.9
- 4) 金子英，岡宗一，松宮直規：デジタルカメラ画像を用いたコンクリート構造物のひび割れ検査技術，NTT 技術ジャーナル，pp.21-24，2011.12
- 5) S.Nishimura, K.Kimoto, S.Kusuhara, S.Kawabata, A.Abe, T.Okazawa: Development of a hybrid camera system for bridge inspection, IABMAS, 2012
- 6) 西村正三，木本啓介，味岡収，安井伸顕，松田浩：光学的計測手法を用いた軍艦島護岸の計測とモニタリング，実験力学，Vol.12, No.3, pp.193-200，2012.9
- 7) 西村正三，藏重裕俊，原健司，石井俊治，加藤淳，大前雅史，山崎博：走行型連続画像計測システムの開発と構造物壁面調査への活用，JAST，Vol.21, pp.40-47，2010
- 8) 西村正三，木本啓介，松岡のどか，大谷仁志，緒方宇大，松田浩：橋梁維持管理における遠隔測定法の開発と評価，応用測量論文集，Vol.24, pp.52-61，2013
- 9) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術‘19 [基礎編]，pp.109-112，2019
- 10) 柳沢栄一，村井亮介，勝野寿男，越川一成，梶本勝也：高感度画像強調カメラを用いたコンクリート床版ひび割れの遠隔点検に関する研究，土木学会年次学術講演概要集，Vol.53, pp.514-515，1998
- 11) 岡俊蔵，村井亮介，勝野寿男，越川一成，佐伯輝夫，藤井堅：CCD カメラを用いたコンクリート床版ひび割れ検出に関する実橋試験，土木学会年次学術講演概要集，Vol.54, pp.452-453，1999
- 12) 小出博，福田貴，勝野寿男，山本利生，村井亮介：デジタルスチル画像によるコンクリート床版ひび割れ認識の研究，土木学会年次学術講演概要集，Vol.54, pp.454-455，1999
- 13) 佐々木聡，渡邊一悟，小出博，山本利生：デジタル画像によるコンクリート床版劣化判定システムの開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.1，2003

(2019.06.30 受付)