論文　反射シールを利用した桁たわみの夜間画像計測

保木本　晟也[1]・松岡　弘大[2]・石井　貴大[3]・中田　悠貴[4]

[1]非会員　公益財団法人鉄道総合技術研究所 情報通信技術研究部（〒185-8540 国分寺市光町 2-8-38）
E-mail: hokimoto.seiya.07@rtri.or.jp (Corresponding Author)

[2]正会員　公益財団法人鉄道総合技術研究所 情報通信技術研究部（同上）
E-mail: matsuoka.kodai.13@rtri.or.jp

[3]正会員　公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部（同上）
E-mail: ishii.takahiro.89@rtri.or.jp

[4]非会員　四国旅客鉄道株式会社 工務部工事課 企画（〒760-8580 香川県高松市浜ノ町 8 番 33 号）
E-mail: nakada-y@jr-shikoku.co.jp

ビデオカメラを利用した橋りょうの桁たわみの画像計測は，実際の鉄道橋での活用が進んでいるものの，十分な照度が確保できる日中のみに実施が限定されている．本研究では，最小限の照明設備および軽量かつ小型の簡易な反射シールを設置して，夜間に適用可能な桁たわみの画像計測手法について検討した．実橋計測の結果，反射シールと周辺とのコントラストを利用することで，20m 程度離れた橋りょうの桁たわみを日中と同等の精度で計測できることを明らかにした．また，日中画像と異なり，反射シールと周辺箇所のコントラストの高い夜間の画像に対しては，ヒストグラム均等化を行わない方が測定精度を確保できることを示した．

Key Words: *optical measurement, railway bridge, girder deflection, reflective sticker*

1. はじめに

鉄道橋の列車通過時の桁たわみは，橋りょうの性能を表す代表的な指標であり，設計および維持管理において広く利用されてきた [1]．ただし，その計測は多大な労力と時間を要する場合が多い．このような背景から，簡易に列車通過時の桁たわみを計測する手法の開発が進められ，すでに多くの手法が実用化されている [2)-5)]．

その中で，撮影機器の高性能化と汎用化，画像処理手法の発展に伴い，ビデオカメラと画像解析による非接触での桁たわみ計測が注目されている [2),6)]．桁たわみの画像計測では，橋りょうにターゲットを設置し，その動きを追跡することで変位を算出するターゲット方式と，橋りょう表面のテクスチャを利用して変位を推定するノンターゲット方式に大別される．特にノンターゲット方式は橋りょうにターゲットを設置するための高所作業が不要であるため，精度の検証だけでなく，実際の鉄道橋での活用がすでに進められている [6)]．

ただし，これまで検討されてきた屋外での桁たわみの画像計測手法は，十分な照度が確保できる日中に限定されていた．一方，特殊車両の走行，入線検討，速度向上試験などは，一般車両の走行が終了した夜間に実施される場合が多いが，このような場合には，これまで検討されてきたノンターゲットでの画像計測の適用は困難である [2)]．このため，高所作業などを要する伝統的なリング式変位計による計測が用いられてきた．なお，近年では，LED式のターゲットを用いた画像計測手法も提案されているが，橋りょう上での電源確保やターゲットの重量増加に伴う設置作業が問題となる場合もある．このほか，橋りょうにターゲットを設置せず，線路外から照明により計測対象橋りょうを照らす方法も考えられるが，この場合には多くの照明設備の用意が別途必要になる．また，撮影距離が遠い場合，そもそも照明設備では桁表面を十分に明るくできない可能性も高い．したがって，最小限の照明設備および電源不要の軽量かつ小型の簡易なターゲットにより，夜間の桁たわみの画像計測が可能となれば，これまでの夜間に実施されてきた桁たわみ計測作業を省力化できると考えられる．

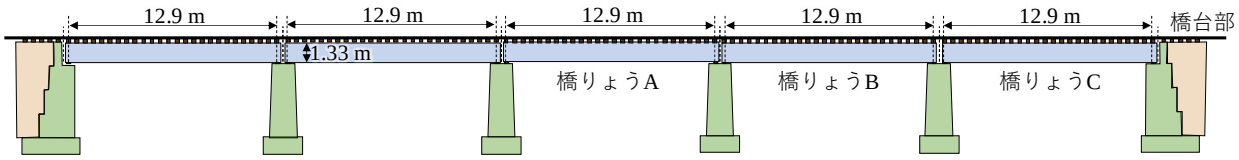


図-1　対象橋りょうの側面図



図-2　対象橋りょうの写真

以上の問題意識のもと，本研究では夜間に実施可能な桁たわみのターゲット式画像計測手法について検討した．具体的には，橋りょうに設置するターゲットとして反射シールを用いたうえで，地上から LED 照明を照射することで，反射シール部分の輝度を確保し，夜間における桁たわみの画像計測を可能とする．地上の LED 照明は，橋りょう本体を明確に照らすほどの光量はないが，反射シールとそれ以外を区別可能なコントラストを生成できる．このコントラストを利用することで，デジタル画像相関法などの一般的な画像処理手法により，反射シール位置の画像上の移動量から桁たわみを計測できると考えられる．ただし，このようなコンセプトに基づく夜間の画像計測手法を実橋りょうで検証した事例は，著者らの知る限り存在しない．本研究では，実路線における鋼鉄道橋を対象とし，日中および夜間の桁たわみ計測を実施するとともに，夜間における反射シールと照明を用いた画像計測精度について考察を行った．

2.　試験方法

(1)　対象橋りょう

図-1 および **図-2** に本研究で計測対象とした橋りょう A，橋りょう B，および橋りょう C の側面図と写真をそれぞれ示す．橋りょう A から C は，在来線単線区間に敷設され，いずれも橋長 13.4m，支間長 12.9m，桁高 1334mm の鋼上路 I 桁橋である．また，当該区間の列車通過速度は 60～100km/h 程度である．建設年代が古いため当該橋りょうの詳細図面は残っていないが，過去の標準桁の一つである達 680 号 40 フィート桁であると考えられる．開床式で床版はなく，橋りょう上フランジに木まくらぎが敷設され，その上にレールが締結装置により固定されている．橋りょう C のみ起点側が橋脚，終点側が橋台となっており，橋台上に端まくらぎが敷設され，橋台裏のバラスト軌道に接続されている．

表-1　使用機器の諸元

機器	ID	型番（メーカ）	主な仕様
ハンディカム 	SC-1	FDR-AX700 (SONY)	1920×1080 pixel 60 fps 光学ズーム 12 倍
ハンディカム	SC-2	同上	同上
高解像度カメラ 	DC-1	Pocket Cinema Camera 6K (Blackmagicdesign)	4096×2160 pixel 120 fps / 60 fps
レンズ	-	SIGMA 150-600mm F5-6.3 DG OS HSM (SIGMA)	最大撮影倍率　1:4.9
U ドップラーII 	UD-II	U ドップラーII (鉄道総研開発)	He-Ne レーザ (クラス 2) 周波数帯：DC～2kHz 計測距離：0.1～100m 自己振動補正機能付き 反射シール使用

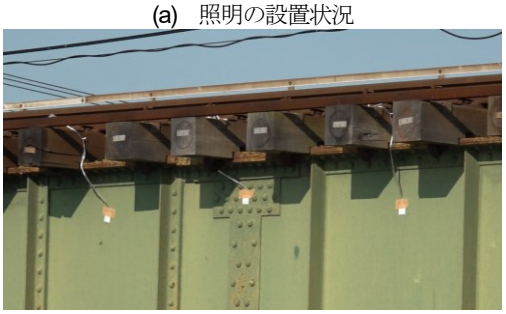
(2)　使用機器

表-1 に計測で利用した機器の概要を示す．ハンディカムは民生品のビデオカメラ 2 台を利用した．また，撮影距離が多少異なる橋りょう A と B を比較的近い精度で撮影できるよう，高解像度カメラは映像作品製作用のシネマカメラに望遠レンズを取り付けて使用した．これらのカメラはいずれも三脚を用いて安定した地面に設置し，60fps で撮影した．カメラによる画像計測との比較対象として，高精度で桁たわみを計測可能である U ドップラーII[4]によるレーザ計測も実施した．U ドップラーII については文献 [4]を参照されたい．以下ではそれぞれについて **表-1** 記載の ID（ハンディカム：SC-1・SC-2，高解像度カメラ：DC-1，U ドップラーII：UD-II）で呼称する．

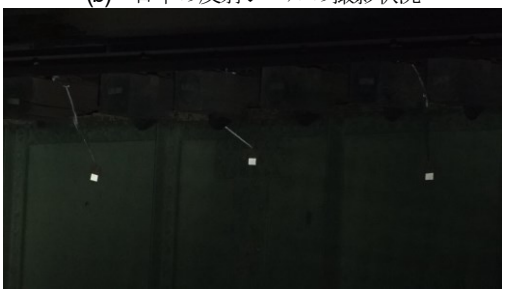
これまで夜間での計測を行う手法として，多数近接照明による光量確保，LED ライト付きターゲットの橋りょうへの設置，などの方法が提案されてきた．しかし，デジタルカメラで撮影する場合は，大規模な照明設備が必要となる．また，照明を設置可能な位置が橋りょうから遠い場合や，橋りょうへの電源を要する機器の設置を避けたい場合には，既存手法の適用が困難である．以上を踏まえ，本研究では遠方からの最小限の照明で撮影できるよう桁に反射シールを設置し，撮影した画像内の反射



(a)　照明の設置状況



(b)　日中の反射シールの撮影状況



(c)　夜間の反射シールの撮影状況

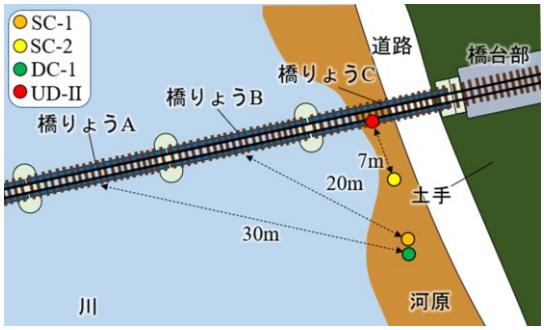
図-3　照明および橋りょうBにおける昼夜での反射シールの状況

シール位置を追跡することで変位を計測した．反射シールの設置により，反射シール以外の箇所の光量が足りない場合でも，反射シール箇所とそれ以外とのコントラストを画像計測に利用できる．これにより，持ち運び可能な1台の照明のみでも十分に画像計測が可能となる．

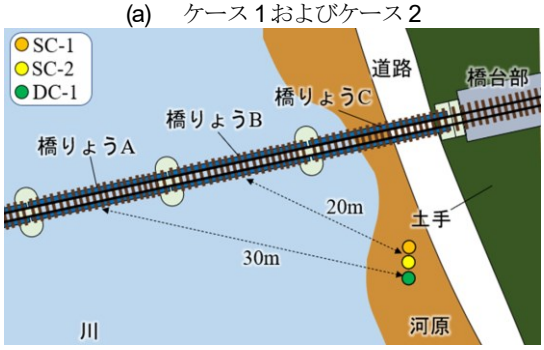
図-3に照明および橋りょうBにおける日中と夜間の反射シールの撮影状況をそれぞれを示す．照明の全光束は約28,080lm，照射角度は約40°である．夜間は橋りょうAとBの間の橋脚が照射範囲の概ね中央となるよう設置した．反射シールは50×50mmのマグネットシートタイプであり，橋りょうAおよびBのウェブ上部にテープで固定した．橋りょうCはUD-IIでの計測を行うため，反射シールは設置していない．なお，反射シールの設置は橋りょう上保守用通路から実施した．このため，線路内立入は必要となるが，高所作業車や足場設置は不要である．また，照明は後述する橋りょうから20mから30m離れた撮影箇所の隣に1台のみ設置した．**図-3(b)**および(c)は撮影動画から切り出した実際の撮影画像の一例である．夜間は光量が少ないため，日中の画像に見られた桁側面のボルトや補剛材などの特徴は不明瞭となる．しかし，反射シール箇所は照明により輝度が十分に確保されており，反射シール以外の箇所と明確なコントラストが生成されることを確認できる．

表-2　計測方法および使用機器と対象箇所

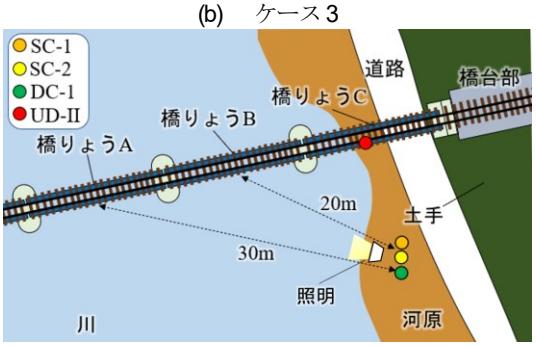
ケース	種別 車両	時刻	橋りょう			目的
			A	B	C	
1	普通 2両	13:41 日中	DC-1	SC-1	UD-II SC-2	SC-2とUD-IIの比較
2	特急 7両	13:44 日中	DC-1	SC-1	UD-II SC-2	
3	普通 2両	14:42 日中	DC-1	SC-1 SC-2		SC-1による 昼夜での比較
4	普通 2両	21:33 夜間	DC-1	SC-1 SC-2	UD-II	
5	貨物 9両	23:30 夜間	DC-1	SC-1 SC-2	UD-II	3橋りょうの比較



(a)　ケース1およびケース2



(b)　ケース3



(c)　ケース4およびケース5

図-4　各ケースにおける機器配置と撮影距離

(3)　計測ケース

表-2に計測ケース，**図-4**に各ケースでの機器配置と撮影距離を示す．ケース1およびケース2では，本試験環境での画像計測の基本的な精度を確認するため，橋りょうCをUD-IIとSC-2により計測した．ケース3およびケース4では，反射シールを利用した夜間画像計測の精度を確認するため，同種の列車通過時の橋りょうBのたわみを日中および夜間で計測した．ケース3は日中，ケース4は夜間である．以上により，画像計測および夜間計測の計測精度を確認したうえで，橋りょうごとのたわみ量

の違いを把握するために，ケース 5 では夜間に橋りょう A，B，および C をそれぞれ DC-1，SC-2，および UD-II で計測した．

(4) 画像処理方法

得られた画像からデジタル画像相関法 [2),6)]により任意箇所の変位を算出する．デジタル画像相関法は，測定対象物の模様のランダム性を利用して複数画像内の対応箇所を抽出する手法であり，対象物の変位の算出に利用されている．物体追跡の代表的な手法であり，橋りょうの変位推定以外にも金属片のひずみ計測等 [7)]で数多くの適用事例が存在する．本研究では，まず（I）ヒストグラム均等化により画像全体のコントラストを上昇させ，続いて（II）テンプレートマッチングによる疎探索で 1 画素単位での移動量を算出したのちに，（III）サブピクセル推定を用いた精密探査で 1 画素未満の移動量を推定する．桁たわみの時刻歴応答の算出を目的とする本研究では，変位が生じていない状態が記録されている 1 フレーム目を基準画像として，2 フレーム目以降との間で順次移動量を求める．デジタル画像相関法のより詳細な説明は，文献 [6)]を参照されたい．

（I）ヒストグラム均等化

後述するテンプレートマッチングの精度低下を防ぐことで，コントラストの低い日中の画像に対しても高精度な物体追跡が可能になるよう，画像処理の前にヒストグラム均等化を行う．ヒストグラム均等化の処理手順については，これまで不明であった夜間での効果と合わせて 3. (2)にて具体的な画像とともに詳細な説明を行う．

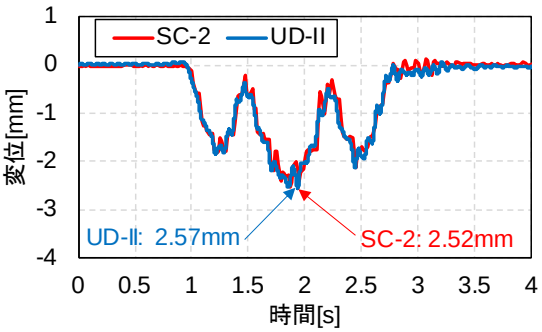
（II）テンプレートマッチング

テンプレートマッチングは，画像から取り出したテンプレートと参照画像の最も類似する箇所を探索する手法である．列車通過時の主桁では，列車の影により画像上での明るさが変動する場合があり，濃度差やその 2 乗和を指標として用いると，明るさの変化から類似度の算定精度が低下する可能性が考えられた．本研究では，各画素における輝度値から領域全体における輝度値の平均を差し引いてから正規化した値である，零平均正規化相互相関 ZNCC（Zero-mean Normalized Cross-Correlation）[6)]を指標とした．各移動位置の相関値を求めることで 2 次元相互相関関数が得られ，その最大値を移動量として算出する．本研究では 21×21 画素のテンプレートを用いた．

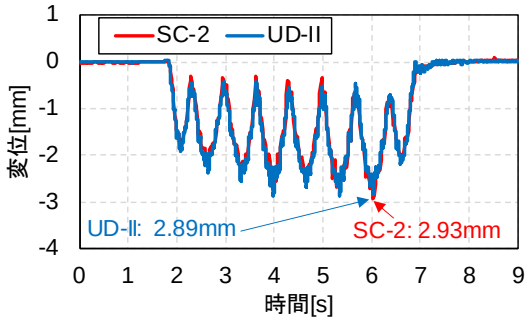
（III）サブピクセル推定

相関値が最大になる画素とその周辺 8 画素の輝度値に対して，最小二乗法による二次曲面のフィッティングを行い，二次曲面に最大値を与える 1 画素未満のサブピクセル移動量を計算する [6)]．

画像から得られる移動量はピクセル単位で表されるため，実寸値への変換を行う．反射シールを用いた画像計測の場合は反射シールの寸法を用いることで正確な換算が可能である．一方反射シールを用いないノンターゲット式の画像計測では，画像上の実寸値が既知かつ撮影中に寸法が変化しない箇所による変換，もしくは事前のカメラ諸元の入手，キャリブレーションおよび正確な撮影距離が必要である．本計測では反射シールを設置していないケース 1 および 2 のみ，画像に映り込んでいる橋りょうの桁高さ（1334mm）を用いた変換を行った．



(a) 計測ケース 1（列車速度：106km/h）



(b) 計測ケース 2（列車速度：107km/h）

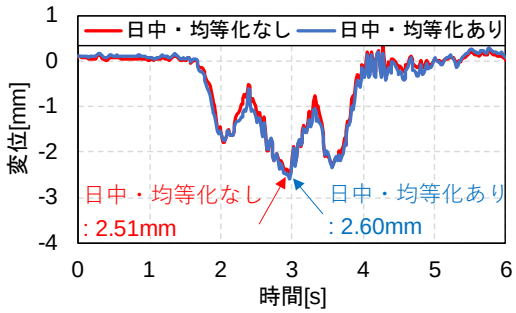
図-5 画像計測およびレーザー計測の比較（橋りょう C）

3. 試験結果と考察

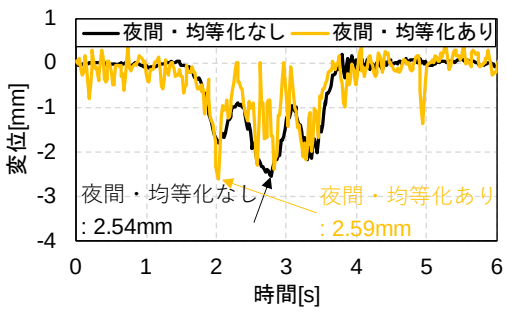
(1) 画像計測とレーザー計測の計測結果の比較

画像計測は，撮影環境や条件により日中であっても計測精度が変化する．ここではまず日中における画像計測の基本的な精度の確認を行った．画像計測の精度を確認するため，日中のケース 1 およびケース 2 において UD-II および SC-2 により計測された橋りょう C の支間中央の変位を比較する．列車速度はいずれのケースでも 106km/h 程度であった．画像処理時のピクセルから変位への寸法変換係数はケース 1，ケース 2 でそれぞれ 1.68[mm/pixel]および 1.66[mm/pixel]であった．

図-5 に UD-II および SC-2 で計測されたケース 1 およびケース 2 の桁たわみ波形および最大値を示す．SC-2 の波形は UD-II の波形と良好に一致している．ケース 1 で各波形で記録された桁たわみ最大値もほぼ同様の値（ケース 1 では UD-II：2.57mm，SC-2：2.52mm，ケース 2 では



(a) 日中



(b) 夜間

図-6 ヒストグラム均等化の有無による計測結果の比較（橋りょう B）

UD-II：2.89mm，SC-2：2.93mm）であり，その差はいずれも 0.05mm 程度であった．また，列車通過時における 2 つのカメラによる計測値の差の標準偏差は，ケース 1 で 0.12mm（0.75 秒～3.50 秒），ケース 2 で 0.10mm（1.70 秒～7.50 秒）であり，桁たわみ最大値の差は両ケースで標準偏差よりも小さかった．以上から，今回の計測条件においても過去の研究結果 [2),9)]と同様に，少なくとも日中においては画像計測により UD-II と同程度の精度で桁たわみが計測できることを確認できた．

(2) 日中と夜間での計測結果の比較

画像解析による日中と夜間の計測精度を確認するため，日中と夜間で同一種別，同一進行方向の列車が通過した際の画像計測結果の比較を行った．日中計測のケース 3 および夜間計測のケース 4 において同じ車種の 2 両編成列車がともに下り方向に通過したため，両ケースで SC-1 により橋りょう B の支間中央を計測した．SC-1 による撮影の様子は，**図-3(b)および(c)**の通りである．日中計測のケース 3 での照度は約 35,000lx であったが，夜間計測のケース 4 での照度は試験の都合上測定していない．なお，乗車率や列車速度（ケース 3 で 82km/h，ケース 4 で 92km/h）の違いに起因する桁たわみの若干の相違が存在する点に留意されたい．画像処理におけるピクセルから変位への寸法変換係数は，ケース 3 で 1.99[mm/pixel]およびケース 4 で 0.56[mm/pixel]であった．

日中に撮影された画像による桁たわみの計測では，撮影表面のコントラストを向上させる目的で，テンプレートマッチングを適用する画像に対してヒストグラム均等化を標準的に行っている．このような処理は主にコンクリート橋などのコントラストが低い構造物の計測で効果を発揮する．しかし，夜間に撮影された画像は，**図-3(c)**に示すように反射シールの白色とそれ以外の物体や背景の黒色により，コントラストが非常に高い．そのため，無理な均等化により黒であった領域のわずかな輝度の変化が誤差となり，計測精度が低下することが懸念された．そこで，ここでは日中と夜間の画像に対して，ヒストグラム均等化の有無を変化させその特徴について分析した．

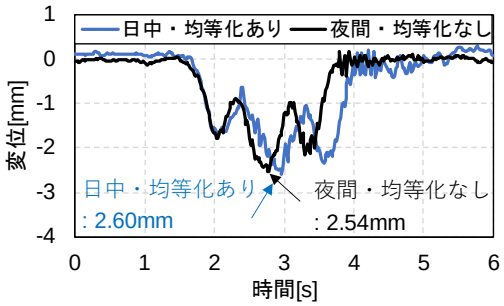
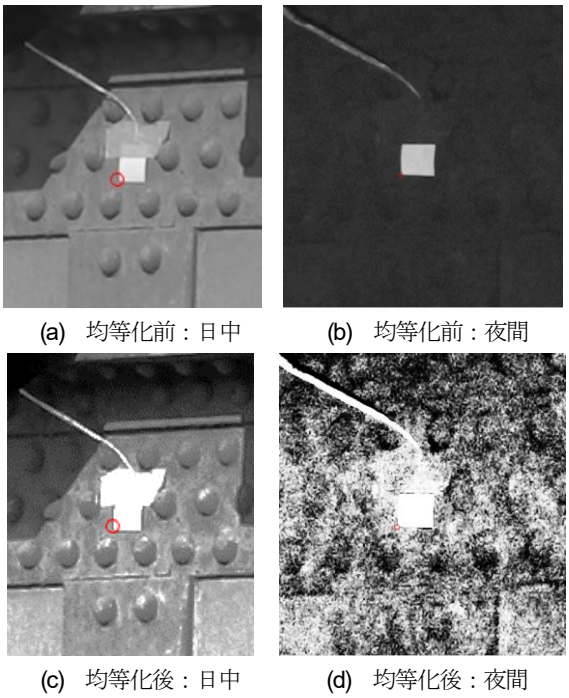


図-7 日中と夜間の計測結果の比較（橋りょう B）

図-6(a)および(b)に SC-1 で得られたケース 3（日中）およびケース 4（夜間）の桁たわみ波形および最大値を，ヒストグラム均等化の有無で分けて示す．**図-6(a)**に示す日中の画像では，ヒストグラム均等化の有無で列車通過時の桁たわみ波形に大きな違いは見られず，桁たわみ最大値はヒストグラム均等化の有無で 2.51mm および 2.60mm であった．一方，**図-6(b)**に示す夜間の画像では，ヒストグラム均等化を行うと，スパイク状のノイズが多く発生して桁たわみ波形が大きく変動した．これにより，桁たわみ最大値が生じる時刻も，先頭車両の通過直後から先頭車両の進入直後へと変化した．以上より，夜間の画像に対してヒストグラム均等化を行うと，桁たわみ波形を正しく計測できない場合があることが明らかとなった．以上を踏まえ，本研究における夜間の画像計測へのヒストグラム均等化は行わないこととした．

図-7 は，これらの検討を踏まえて算出したケース 3（日中：ヒストグラム均等化あり）およびケース 4（夜間：ヒストグラム均等化なし）の桁たわみ波形および最大値を示す．列車速度が異なるため波形の位相が若干異なるが，列車通過時の桁たわみ波形は概ね同じ傾向を示す．また，日中と夜間で桁たわみ最大値の差は 2.3%程度（0.06mm）と，3.(1)に示した画像計測とレーザー計測の誤差程度であり，概ね一致していると言える．以上から，反射シールと 1 台の照明を利用することで，20m 程度離れた橋りょうの桁たわみを日中と概ね同等の精度で夜間でも画像計測できることを確認した．

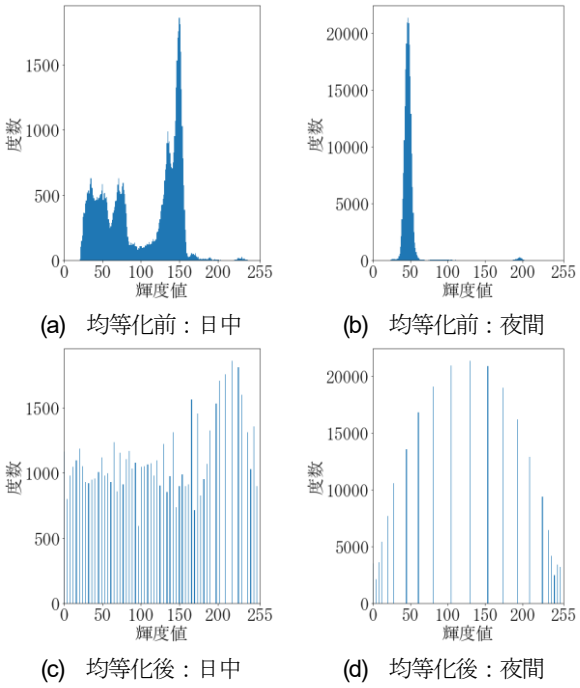
なお，ヒストグラム均等化が夜間の撮影画像に及ぼす影響は，既往研究において詳細に分析されていない．



(a) 均等化前：日中　(b) 均等化前：夜間

(c) 均等化後：日中　(d) 均等化後：夜間

図-8 計測対象箇所のコントラストの違い



(a) 均等化前：日中　(b) 均等化前：夜間

(c) 均等化後：日中　(d) 均等化後：夜間

図-9 輝度分布の比較

そこで，ヒストグラム均等化の影響について処理前後の画像および輝度分布の観点から考察を加える．

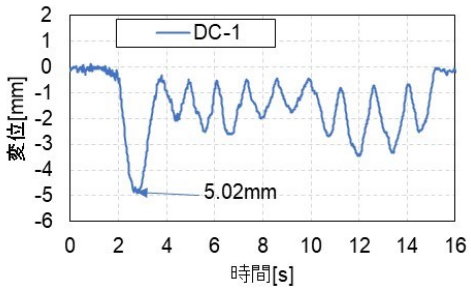
図-8(a)，**(b)**，**(c)**，および**(d)**に，ヒストグラム均等化を行う前後における，日中および夜間の画像を示す．日中と夜間の画像の画角の差異は，ヒストグラム均等化が画像に及ぼす影響を把握する上では問題ないと考えられる．**図-8(a)**，**(c)**で反射シール周辺に着目すると，反射シールの白色がより強調され，周囲とのコントラストが明確になることを確認できる．一方，夜間の画像にヒストグラム均等化を行うと，**図-8(d)**に示すように，もともとほぼ黒であった箇所の一部が白もしくはグレーに変換される．ただし，これにより均等化前に明確であった反射シールと周辺の境界部のコントラストが，不明瞭となる．加えて，ほぼ黒である輝度を均等化しているため，わずかな輝度の変化によりヒストグラム均等化後の輝度が大きく変動する．

図-9(a)，**(b)**，**(c)**，および**(d)**に，**図-8** の各画像における輝度分布を示す．**図-9(a)**に示す通り，日中の画像においては，輝度値が反射シール箇所で 220 から 240 付近，橋りょうウェブ箇所で 20 から 200 付近に分布していた．これに対して，ヒストグラム均等化を行うことで，**図-9(c)**に示すように，輝度値は 0 から 255 までの均等に分布する．一方，**図-9(b)**からも明らかなように，ヒストグラム均等化を行う前の夜間の画像の輝度値は，反射シール箇所で 190 から 200 付近，その他の部分で 25 から 60 付近と，非常に狭い範囲に分布していた．反射シールのように一部の輝度値のみが高い画像はデジタル画像相関法におけるテンプレートマッチングにより適しているため，ヒストグラム均等化を行わなくても日中と同様の計測精度が確保できたと考えられる．しかし，夜間の画像に対してヒストグラム均等化を行うと，**図-9(d)**に示す通り，25 から 60 付近に集中していた輝度値が 0 から 255 までの広い範囲に均等化された．特に反射シール付近で輝度値が上限に近づいた箇所は，デジタル画像相関法において反射シールの一部と認識され，テンプレートマッチングの精度を低下させた．本計測では，**図-8(d)**で示した反射シールとウェブの境界が不明瞭な部分がテンプレートマッチングの精度低下を引き起こし，**図-6(b)**黄線の桁たわみ波形が現れたと推測される．加えて，元画像では輝度値が 25 から 60 付近の狭い範囲に分布していたため，元画像における輝度のわずかな変化により，ヒストグラム均等化後の輝度値が大きく変化してしまった．実際に，**図-8(d)**の画像の異なる時点ではウェブにおいて白く表示される箇所が大きく異なる場合が散見された．このような画像処理上の誤差により，**図-6(b)**黄線にスパイク状のノイズが生じたと考えられる．

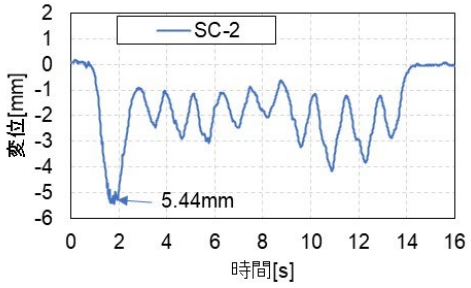
(3) 3 橋りょうでの比較

これまでの試験結果から，桁側面に反射シールを設置すれば 1 台の照明により夜間であっても列車通過時の桁たわみを日中と同程度の精度で計測できることを示した．

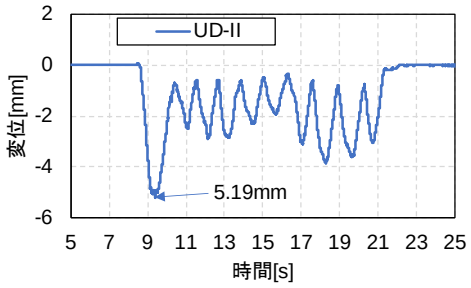
そこで，より簡易に計測できるようになった桁たわみを橋りょうの維持管理に活用する事例として，カメラと U ドップラーII による 3 橋りょうの同時計測を行い，桁たわみの相対比較による性能評価，および今後の調査の優先順位付けについて検討した．ここでは夜間計測のケ



(a) 橋りょうA（DC-1）



(b) 橋りょうB（SC-2）



(c) 橋りょうC（UD-II）

図-10 貨物列車通過時の各橋りょうの桁たわみ計測結果

ース5において，貨物列車通過時に3橋りょうを同時に計測した．対象橋りょうはDC-1が橋りょうA，SC-2が橋りょうB，UD-IIが橋りょうCであり，計測箇所はいずれも支間中央である．

図-10および**表-3**に得られた桁たわみ波形および最大値をそれぞれ示す．いずれの橋りょうでもほぼ同様の桁たわみ波形が計測されていることを確認できる．また，いずれの橋りょうでも貨物列車の動力車である先頭車両通過時に最大変位が記録された．貨物列車は旅客列車より荷重が大きいため，ケース1からケース4と比較して桁たわみも倍程度となっている．

表-3 最右列は3橋りょうに対する桁たわみ最大値の相対比較を示す．UD-IIにより計測した橋りょうCを1とした場合，橋りょうAは3%（0.17mm）ほど小さく，橋りょうBは5%（0.25mm）ほど大きい．これまでの検証結果から，UD-IIと画像計測との差および，日中と夜間の画像計測の差はいずれも0.06mm程度以下である．また，標準偏差は0.1mm程度であるため，その2倍0.2mm以上で統計的に有意な差と言える．以上を踏まえると，橋りょうAと橋りょうCの差は有意とは言えないが，橋りょうBと橋りょうCの差（0.25mm），橋りょうBと

表-3 貨物列車通過時の各橋りょうの桁たわみ最大値

橋りょう	桁たわみ最大値 [mm]	橋りょうCに対する変位差 [mm]	橋りょうCに対する比率
橋りょうA	5.02	-0.17	0.97
橋りょうB	5.44	0.25	1.05
橋りょうC	5.19	-	1

橋梁Aの差（0.42mm）は誤差とは言えず，橋りょうの状態もしくは性能に起因するものと推察される．なお，これらの橋りょうの形式および支間長は同一である．ただし，橋りょうAおよび橋りょうCは橋りょう上にレール継目が存在する．したがって，橋りょうAおよびCではレール継目通過時に生じる衝撃力により桁たわみ最大値がレール継目のない橋りょうBよりも大きくなる可能性がある．しかしながら，実際には**表-3**に示すようにレール継目のない橋りょうBの桁たわみ最大値がもっとも大きいため，橋りょうBには他の橋りょうAおよびCにはない構造的な特徴もしくは変状が想定される．なお，計測時に行った外観目視では橋りょうAの桁端部に腐食が確認されたが，橋りょうBおよびCでは桁たわみを増大させるような変状を確認できていない．今後，橋りょうBの桁たわみが大きい原因を明らかにするため，支承部の浮き・あおり[8]などの詳細な計測および調査を行う予定である．

上記の例では各橋りょうで異なる計測方法を用いたが，複数台のビデオカメラにより同様の計測を行うことも可能である．比較的安価かつ容易に設置できる民生品のビデオカメラを複数台使用すれば，従来は費用や労力の面で困難であった複数橋りょうに対する桁たわみの計測および比較が可能だと考えられる．加えて，反射シールと持ち運び可能な照明を使用すれば，夜間であってもビデオカメラによる画像計測を実施できる．同時に計測を実施した場合，上述の通り，各橋りょうに対して車両側の条件はほぼ一致するため，橋りょう間の性能の相対比較，および詳細調査などの優先順位付けが容易となる．

4. まとめ

本研究では夜間におけるビデオカメラを利用した簡易な桁たわみの画像計測について検討した．得られた知見を以下にまとめる．

- 橋りょう側面に反射シールを設置することで，橋りょうから20m程度離れた箇所に設置した照明およびビデオカメラにより，夜間でも列車通過時の2.5mm程度の桁たわみを0.06mm程度の誤差で画像計測できることを明らかにした．
- 反射シールを用いることで橋りょう側面自体を撮

影可能な明るさを確保できない場合でも，反射シール周辺の輝度分布を利用することで，画像計測が適用可能であることを確認した.

- 夜間での桁たわみの画像計測では，反射シール箇所と他箇所の輝度の差が大きいため，画像処理を行う際に用いられるヒストグラム均等化を実施しない方が精度を確保できることを明らかにした.
- 夜間に同形式の3橋りょうを複数カメラを用いて同時計測することで，対象橋りょうの相対比較や性能評価も可能となり，橋りょうの調査の優先順位付けにも有効であることを示した.

今回の計測時は雨風ともになく良好な撮影環境であったが，雨天や強風時には依然として画像計測が適用できない場合も多い．今後，風防など悪天候時に対応した撮影方法に加え，オプティカルフロー推定などと合わせた画像処理によるカメラや三脚の揺れの影響低減法について検討していく予定である．また，今回桁たわみが相対的に大きかった橋りょうBについては別途調査を実施し，その原因を明らかにする予定である.

謝辞：本研究の一部はJSPS科研費22H01579の助成を受けたものです．ここに記して感謝の意を表します.

REFERENCES

1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説―変位制限，丸善，2006. [Railway Technical Research Institute: Design Standards for Railway Structures and Commentary (Displacement Limits) , Maruzen, 2006.]
2) Matsuoka, K., Uehan, F., Kusaka, H. and Tomonaga, H.: Experimental Validation of Non-Marker Simple Image Displacement Measurements for Railway Bridges, Applied Sciences, Vol.11, No.25, p.7032, 2021.
3) 徳永宗正，池田学，吉田幸司：実測加速度積分による列車通過時の単純支持橋りょうの変位応答波形の復元，土木学会論文集A1 (構造・地震工学)，Vol. 78, No. 1，pp. 47-60，2022. [Tokunaga, M., Ikeda, M. and Yoshida, K.: Displacement Response Waveform Res-toration of Simply Support Bridge During Train Passage Based on Measurement Acceleration Integration, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1, Vol. 78, Issue 1, pp. 47-60, 2022.]
4) Uehan, F.: Development of the U-Doppler non-contact vibration measuring system for diagnosis of railway structures, Quarterly Report of RTRI, Vol.49, No.3, pp.178-183, 2008.
5) Matsuoka, K. and Tanaka, H.: Drive-by deflection estimation method for simple support bridges based on track irregularities measured on a traveling train, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.182, No.109549, 2023.
6) 四井陽貴，松岡弘大，貝戸清之：サブピクセル推定誤差発生メカニズムに着目した橋梁変位の全視野画像計測の実用的改善法，土木学会論文集，Vol.79，Issue.15，No. 22-15054，2023. [Yotsui, H., Matsuoka, K. and Kaito, K.: Practical Improving Methods for Full View Optical Measurement of Bridge Displacements which Focuse on the Causes of Error in Subplixel Estimation, Japanese Journal of JSCE, Vol.79, Issue.15，No. 22-15054，2023.]
7) 出水亨，松田浩，戸次翔，森崎雅俊，内野正和，伊藤幸広，森田千尋：デジタル画像相関法のひずみ計測向上に関する基礎的研究，土木学会論文集A2（応用力学），Vol.68，No.2，pp.I_683-I_690，2012. [Demizu, A., Matsuda, H., Hetsugi, S., Morisaki, M., Uchino, M., Ito, Y. and Morita, C.: Fundamental Study on Improvement in Strain Measurement Accuracy of Digital Image Correlation Method, Journal of JSCE, Ser. A2, Vol.68, No.2, pp. I_683-I_690, 2012.]
8) 川田真也，塚原高志，窪田利幸，松田芳範：JR東日本における鉄道橋支承部の変状対策，インフラメンテナンス実践研究論文集，Vol.1，No.1，pp.445-451 2022. [Kawada, S., Tsukahara, T., Kubota, T. and Matsuda, Y.: Measures for Deterioration of Railway Bridge Bearings in JR East, Infrastructure Maintenance Practices, Vol.1, No.1, pp.445-451, 2022.]

(Received March 31, 2023)
(Accepted June 9, 2023)

IMAGE MEASUREMENT OF BRIDGE DEFLECTIONS AT NIGHT USING REFLECTIVE STICKERS

Seiya HOKIMOTO, Kodai MATSUOKA, Takahiro ISHII and Yuki NAKADA

Image measurement of bridge deflection using a video camera has been used in actual railway; however, applications are limited to daytime when sufficient illumination can be secured. In this study, the authors investigated a method for image measurement at night using a minimal amount of lighting equipment and a light, small, and simple reflection sticker. As a result of the actual bridge measurement, it is possible to measure the girder deflection of the bridge about 20 m away with the same accuracy as during the daytime by using the contrast between the reflection sticker and the surroundings. In addition, unlike daytime images, measurement accuracy can be secured without histogram equalization for nighttime images where the contrast between reflective stickers and surrounding areas is high.