

# ビデオ撮影から 鉄道橋のたわみ波形を測る



**保木本 晟也**  
Seiya Hokimoto  
情報通信技術研究部  
情報解析研究室  
研究員



**松岡 弘大**  
Kodai Matsuoka  
情報通信技術研究部  
情報解析研究室  
主任研究員  
(兼 鉄道力学研究部 構造力学研究室)



**服部 紘司**  
Koji Hattori  
鉄道力学研究部  
構造力学研究室  
研究員



**上半 文昭**  
Fumiaki Uehan  
鉄道力学研究部長

## はじめに

鉄道橋を列車が通過すると図1に示すように車両の重みの偏り(車軸配置)に合わせて鉄道橋が下側にたわみます。一般に、橋りょうに発生するたわみ量と応力度との間には、相関があることが知られているため、橋りょうに構造的な影響が懸念される変状が生じた場合にはたわみ量を測定し、当該橋りょうの過去の測定値や類似橋りょうとの比較、あるいは計算値との差異を分析することにより、橋りょうの健全性を評価することができます。また、桁たわみの大きさは、軌道の変位に影響するため列車の乗り心地や走行安全性にも影響を及ぼします。さら

に、列車通過後に見られる残留波形を分析すれば、固有振動数やモード減衰比といった橋りょうの振動に関する情報が得られます。これらは高速走行時の共振などの橋りょう振動や関連する疲労評価において重要となります。このよ

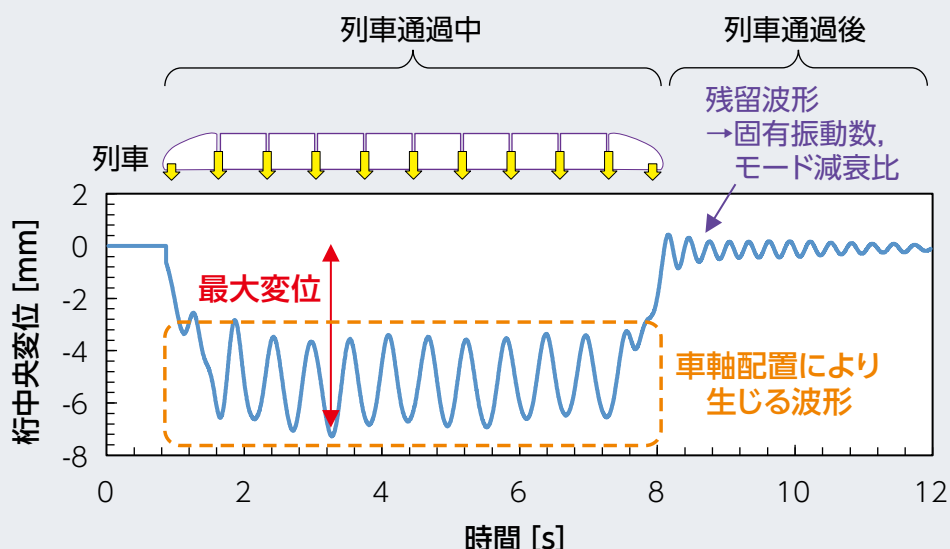
## 共振

ブランコは吊り材の長さにより揺れやすい固有の振動数が存在します。この固有振動数に合わせて、ブランコに乗る人の背中を押すと、揺れが増幅してさらに大きく揺れるようになります。橋りょうも同様で、その曲げ剛性と質量により揺れやすい固有の振動数が存在し、列車を構成する車軸がこの固有振動数に合わせて橋りょうを加振すると、応答が増幅していきます。このような現象を共振と呼びます。

## 橋りょうに発生するたわみ量と応力度

既知の列車荷重とたわみ量から、橋りょうの曲げ剛性を逆算することができます。この曲げ剛性を用いて、橋りょうに発生するコンクリートや鉄筋、あるいは鋼材の応力度(単位面積当たりに生じる力)を推定することができます。たわみ測定は応力度の測定に比べると簡便であるため、変状が生じた橋りょうでは、たわみ測定による管理が広く用いられてきました(鋼橋において部材単位での応力度の評価が必要な場合を除く)。

図1 桁たわみ波形の評価例



うな橋りょうの性能情報を含む桁たわみ波形は古くから現地での計測が行われてきました<sup>1)</sup>。

図2は、鉄道橋の4つの代表的な桁たわみ計測手法を示します。古くから①リング式変位計が利用されていますが、橋りょう直下への機器設置と高所作業が必要でした。このため、桁下以外から計測できる②レーザードップラー速度計<sup>2)</sup>や③画像計測<sup>3)</sup>、④車上計測<sup>4)</sup>による桁たわみの効率的な計測手法が開発・実用化されてきました。このうち、車上計測は効率的ですが、最大たわみのみの計測であるため詳細検査の前の1次スクリーニングに適しており、詳細検査では引き続き地上からの計測が必要となっています。画像計測手法は、ビデオカメラおよび画像処理手法の急速な普及により、車上計測よりも高精度、かつリング式変位計やレーザードップラー速度計よりも簡易かつ廉価に桁たわみを計測できます。本稿では、これまで開発してきた桁たわみの画像計測手法について説明します。

## ビデオカメラによる画像計測

### 桁たわみの画像計測技術の構成要素

桁たわみをビデオカメラと画像処理により計測する場合には①ビデオカメラ性能、②画像処理手法、③撮影方法の3つが精度を大きく左

右します。このうち、①ビデオカメラの性能は近年急速に向上しており、比較的廉価な民生品のハンディーカメラであってもフルHDかつ60fpsで撮影可能です。操作も容易なためカメラの専門知識がなくとも画像計測に必要な品質の映像を撮影できます。本稿では入手が容易で価格も比較的廉価なハンディーカメラ (SONY: FDR-AX700) を利用しますが、画素数とフレームレートが同様であれば、ほかのビデオカメラでも以下の②画像処理手法、および③撮影方法により桁たわみの画像計測が可能です。

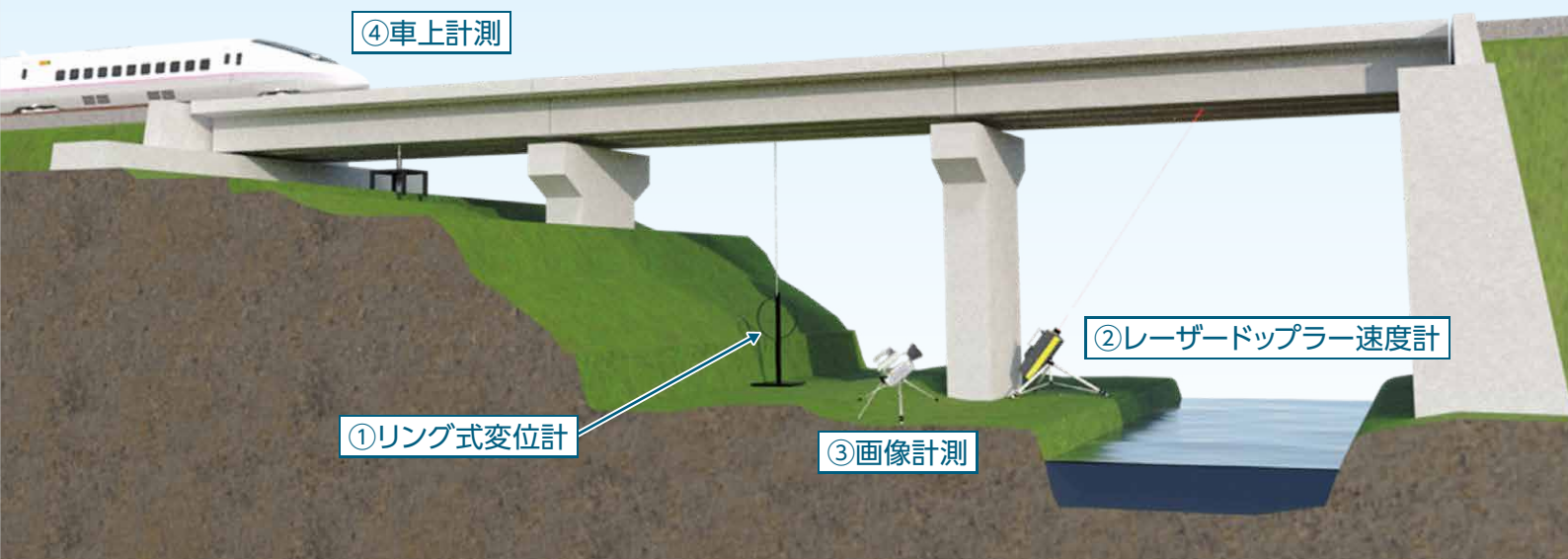
### 画像処理手法

画像処理によりビデオカメラで撮影した1画像ごとの橋りょうの移動量を推定します。この移動量から橋りょうの鉛直方向の変位である桁たわみを算出します。さまざまな画像処理手法がありますが、ここでは最も一般的なデジタル画像相関 (DIC) 法<sup>1)</sup>を用いた手法を説明します。DICでは撮影された映像を1枚ごとの画像に分解したうえで、テンプレートマッチング<sup>2)</sup>と

#### テンプレートマッチング

画像から取り出したテンプレート画像を入力画像と照らし合わせ、最も類似する位置を探索する画像処理手法です。本手法では21×21画素のテンプレート画像から、明暗の変化を考慮して桁の移動量を計算しました。

図2 桁たわみ計測手法の例



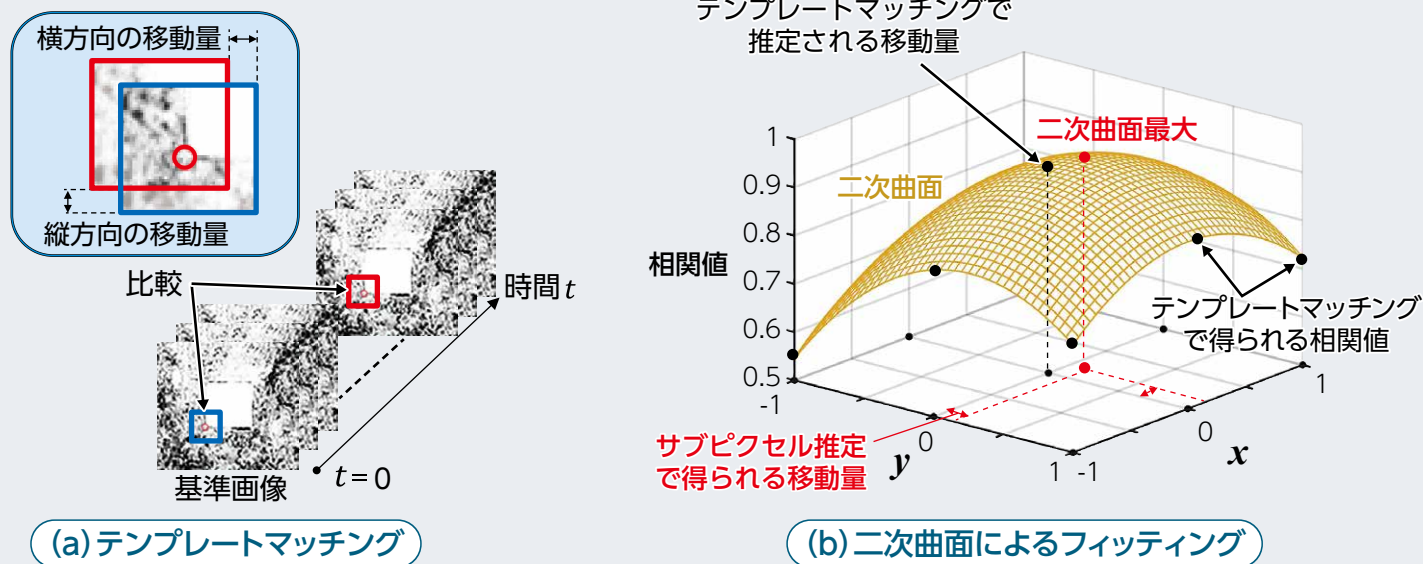
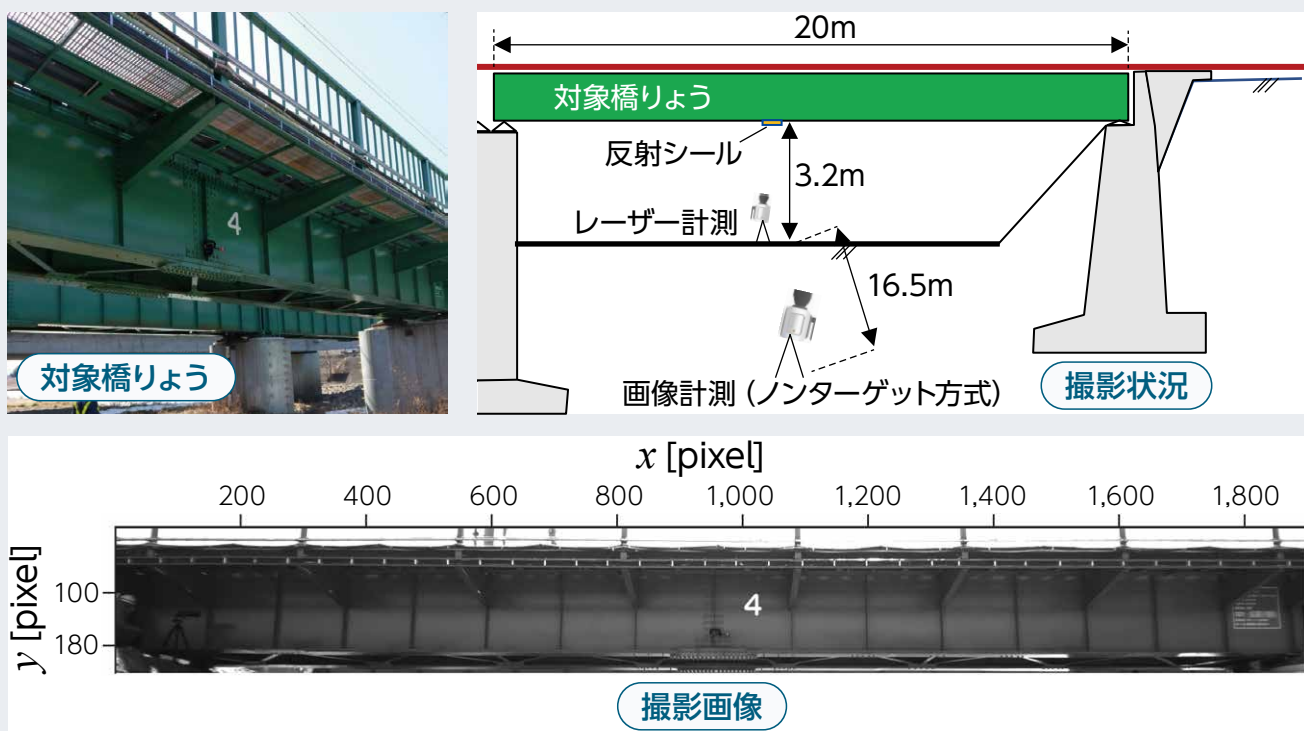


図3 画像処理手法のイメージ図

よばれる手法により、画像内の模様などの特徴の類似性（相関）を利用し、各画像が基準画像から何画素分だけ移動したかを計算します（図3(a)）。テンプレートマッチングは1ピクセル単位で移動量を計算しますが、1ピクセル単位では桁たわみの計測精度として十分ではありません。そこでサブピクセル推定とよばれる以下の処理を行います。最もマッチする移動量周辺の相関値から相関値が高い領域の分布を補完し、補完した分布が最大となる移動量を計算す

ることで、1ピクセル以下の移動量を推定します。二次元の画像に対して移動量を計算するため、図3(b)に示す二次曲面を補完関数として利用したサブピクセル推定を行っています<sup>5)</sup>。最後に、画像内の寸法がわかっている部材やマーカを利用してピクセル単位の移動量を実寸値へ変換します。本処理を実装した画像処理プログラムはノートPCでも実行可能であり、数十秒の映像から数分程度で桁たわみ波形を算出できるため、現場でも結果を確認できます。

図4 事例A：撮影の様子



## 撮影方法

撮影方法は、橋りょうに目印となるマーカーを設置するターゲット方式と設置しないノンターゲット方式に大別されます。ノンターゲット方式は画像処理でマーカーを利用せず、橋りょう表面の模様を手掛かりに上記の画像処理を行います。高所作業や線路内立入がなく容易に計測可能です。また、同じ画像内であれば複数箇所の桁たわみを1台のカメラで計測できます。計測精度は橋りょうの表面状態（模様や特徴の有無）<sup>5)</sup>や明るさ<sup>3)</sup>に依存しますが、晴天かつ日中であれば撮影距離20mで誤差0.3mm以下で桁たわみを計測できます。

ターゲット方式は、橋りょうの撮影面に目印となるマーカーを設置し、画像内のマーカーの動きを追跡することで桁たわみを計測します。単純な目印としてのマーカーのほか、モアレ現象を利用した格子状マーカーなどが存在します<sup>1)</sup>。マーカー設置に高所作業や線路内立入を要するため、画像計測の手軽さは低減しますが、ノンターゲット方式で対応できない夜間の画像計測が可能となります。これにより試験走行な

ど主に夜間に実施される桁たわみ計測に画像計測を活用できます。また、これまでの夜間画像計測では、大規模な照明を要することが課題でしたが、反射材をマーカーとして利用することで簡易な照明設備のみでの夜間の画像計測を可能にしています<sup>6)</sup>。

## 活用事例

桁たわみの画像計測手法は実験室での試験により精度を検証<sup>1)</sup>したうえで、現地試験により適用性の検証を実施してきました。ここでは桁たわみの画像計測事例として、昼間のノンターゲット方式（事例A）と夜間のターゲット方式（事例B）を紹介します。

### 事例A：昼間

図4に示す河川橋りょう（鋼デッキガーター、径間長約20m）を対象とし、桁たわみの画像計測を行いました。橋りょうから16.5m程度離れた位置に設置したビデオカメラにより、6両編成列車が走行した際の橋りょう中央の桁たわみ波形を計測しました。図5に計測結果を示しますが、画像計測により得られた桁たわみ波形

図5 事例A：画像計測とレーザー計測の比較

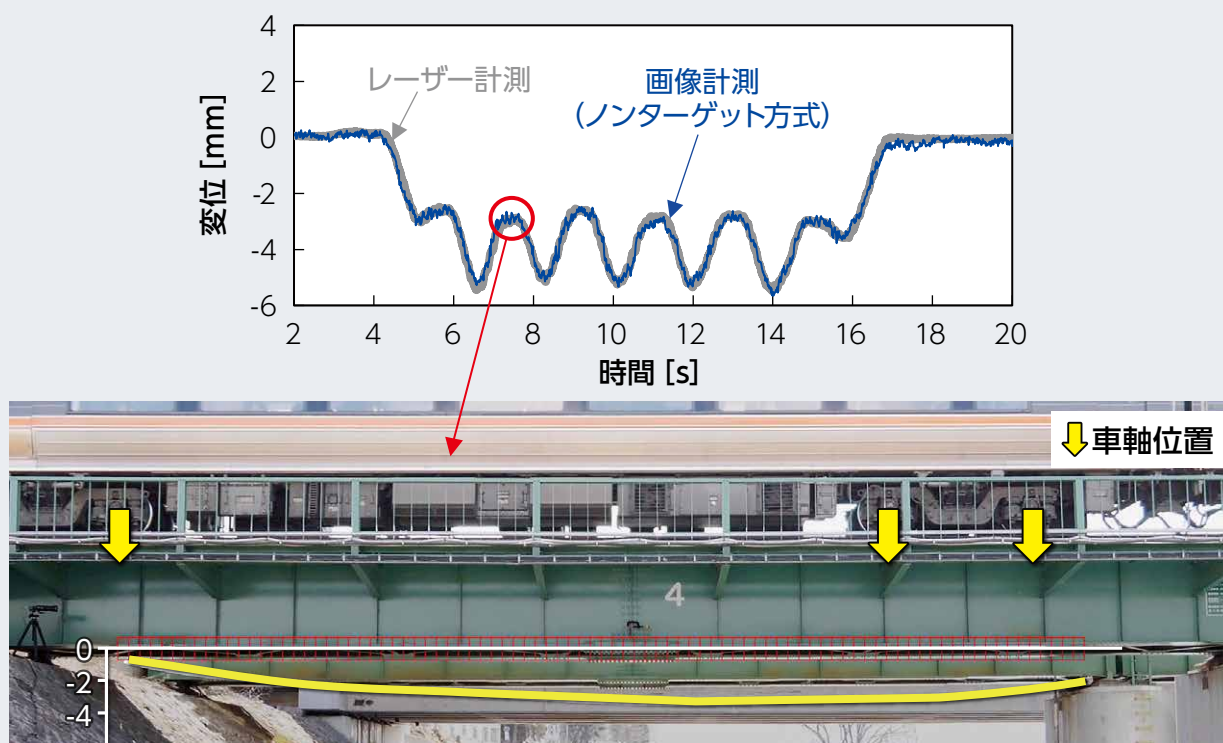




図6 事例B：撮影の様子

は、精度検証のために同時に実施したUドップラーII<sup>®</sup>によるレーザー計測の結果と良好な精度で一致します。精度検証のほか、同図下段に示すように、下フランジに沿って変位計測点を配置することにより、列車通過時の各時点における桁たわみ形状を計測することもできます。これにより橋りょうの変形挙動や局所的な変形の有無を調査することができます。

### 事例B：夜間

図6に示す河川橋りょう（鋼デッキガーター、

#### UドップラーII

レーザーによる構造物の非接触検査作業が可能なシステムで、2016年に鉄道総研が開発しました。センサー自身の揺れの影響を補正する機能を有している点が特徴です。UドップラーIと比較して小型・軽量化や計測距離の長距離化などの改良が施されています。

支間長約13m)を対象とし、昼間および夜間の画像計測を行いました。ここでは橋りょうウェブに設置した反射シールをマーカーとして利用するとともに、夜間における計測では列車走行に支障しないよう鉄道橋から20m程度離れた場所に簡易な照明(LEDライト)を1台設置しました<sup>6)</sup>。昼間と夜間で撮影された橋りょう画像の例を図6下段に示します。夜間の画像のように桁部材を判別できるほど明るくできない場合でもマーカー部分ははっきりと映っており、この箇所を画像処理により追跡することで、夜間でも桁たわみを計測できます。

昼間と夜間に同じ車種の2両編成列車が同じ方向に走行した際の桁たわみ波形を図6に示します。列車速度の違いにより両者の桁たわみ波形は若干ずれているものの、波形の形状および

桁たわみの最大値が良好に一致することを確認できます。

### 桁たわみ計測手法の整理

本稿で解説した画像計測を含め、代表的な桁たわみの計測手法の特徴を表1に整理しました。画像計測は高所作業などがなく、計測機器が安価であることなどに利点があります。また、現地に持っていく道具はビデオカメラと三脚のみであるため、下見や立入前の待機時など隙間時間でも簡易に桁たわみを計測できます。ただし、精度が天候に左右されるとともにリング式変位計やレーザー計測の方が計測精度は高いため、ひび割れなどが生じた桁への対策要否を判断するなど、高い計測精度が求められる場合などは画像計測以外の計測手法の適用も検討すべきでしょう。

### おわりに

鉄道橋の性能として重要な指標である列車通過時の桁たわみ波形を、ビデオカメラで昼夜を問わず簡易に計測する手法を紹介しました。現在、さらに便利で確実な画像計測手法とすべく、風や雨など環境条件に対応した撮影方法や画像処理について、鉄道事業者と連携しながら開発を進めています。

本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施しました。RRR

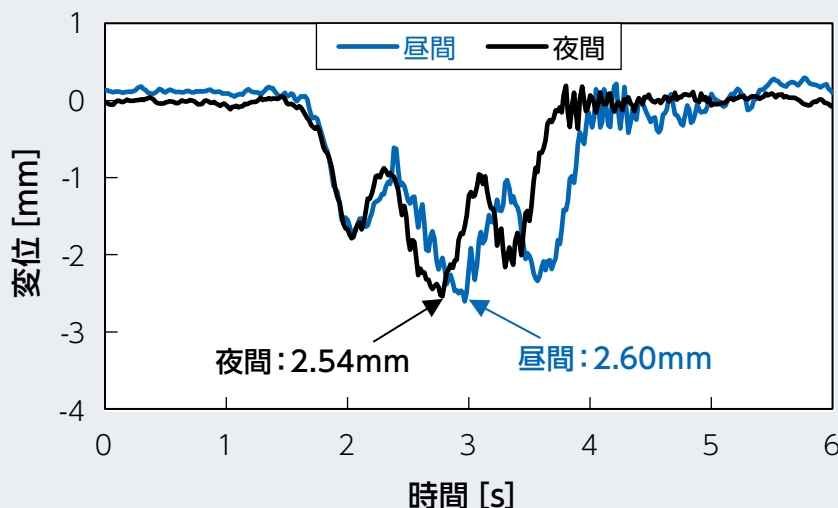


図7 事例B：昼間と夜間の計測結果の比較

表1

計測手法	評価指標	精度	適用範囲	マーカー	計測場所	費用	天候の影響
① リング式 変形計	たわみ波形, 最大たわみ, 固有振動数	◎	高さ1m~ 20m程度	必要	桁直下	中程度	強風時精 度低下
② UドップラーII (レーザー計測)	たわみ波形, 最大たわみ, 固有振動数	◎	距離0.1m ~約100m	一部 必要	桁直下・ 斜め下	高価	小さい
③ 画像計測 (昼間)	たわみ波形, 最大たわみ (固有振動数 は難しい場 合あり)	○	距離50m 程度以下 長距離ほど 精度低下	不要	桁周辺	安価	雨天不可 強風時精 度低下
③ 画像計測 (夜間)	たわみ波形, 最大たわみ, (固有振動数 は難しい場 合あり)	○	距離50m 程度以下 長距離ほど 精度低下	必要	桁周辺	安価	雨天不可 強風時精 度低下
④ 車上計測	最大たわみ	△	文献4参照	不要	-	軌道検 測装置 を活用	小さい

### 文 献

- 石川太郎, 西恭彦, 進藤良則: 整備新幹線における単純PC桁のたわみ測定結果に関する考察, 鉄道工学シンポジウム論文集, No.21, pp.225-231, 2017
- 上半文昭: 鉄道構造物の遠隔非接触検査技術の開発-レーザードップラー振動計測とドローン計測の応用事例, 実験力学, Vol.17, No.4, pp.281-289, 2018.
- Matsuoka, K., Uehan, F., Kusaka, H., Tomonaga, H.: Experimental Validation of Non-Marker Simple Image Displacement Measurements for Railway Bridges, Applied Sciences, Vol.11, No.25, p.7032, 2021
- 松岡弘大, 田中博文: 車上計測された軌道変位に基づく鉄道橋の準静的な桁たわみ推定法, 土木学会論文集, Vol.79, No.15, ID.22-15051, 2023.
- 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
- 保木本晟也, 松岡弘大, 石井貴大, 中田悠貴: 反射シールを利用した桁たわみの夜間画像計測, 鉄道工学シンポジウム論文集, No.27, pp.111-118, 2023