

高解像度カメラの広角測定による 橋りょうの多点同期変位測定



徳永 宗正
Munemasa Tokunaga
鉄道力学研究部
構造力学研究室
主任研究員

はじめに

鉄道橋りょうのたわみは、列車の走行安全性や乗り心地に大きな影響を及ぼすことから、設計や維持管理における構造性能の指標として用いられてきました¹⁾。たわみは、汎用の変位計やレーザードップラー式²⁾の速度計を用いて測定できますが、橋りょう直下に測定機器を設置する必要があります。河川橋などの場合には設置が困難、また架道橋の場合には道路交通の遮断が必要となるなど、測定にあたって多くの課題があります。

近年のカメラの高性能化と低価格化により動画による非接触測定が急速に普及しています。デジタル画像相関法などにより、測定対象物にターゲットを設置しないノンターゲットでの変位測定も簡易で安価に可能となっています。

画像内の模様¹の動きを推定するデジタル画像相関法を用いた多点同期の変位測定では、測定対象に対してカメラを真正面に設置する必要がありますが、橋りょう測定においては河川や道路などにより必ずしも真正面から撮影できません。斜めから被写体を撮影した場合、画像内の各位置で射影歪み²が発生します。この射影歪みを補正して画素移動量を橋りょうの変位に変換できれば効率的な変位評価が可能となりますが、体系的な分析手法は確立されていませんでした。

本研究では1台の高解像度カメラと一般的な広角レンズの仕様を前提とし、撮影方法や分析方法の工夫により、鉄道橋りょうの列車通過時変位の多点同期測定を実現するための検討を行いました³⁾。

広角測定による橋りょうの変位推定方法

分析フロー

図1は、本研究で提案する撮影動画の処理フローです。撮影では複数の評価点を撮影範囲に収めて動画を撮影します。分析ではデジタル画像相関法を用いたサブピクセル推定³⁾により、評価点の移動に伴う画素移動量を推定します。その後、広角レンズを使用した際に顕著となる射影歪みや、レンズの特性によって直線が画面上で曲がって写ってしまう歪曲収差⁴⁾による歪みを補正し、橋りょうの変位へと変換します。

射影歪み

射影歪みとは、カメラで斜めから物体を撮影した際に、画像の形や位置が実際と異なって見える現象です。これは三次元の情報を二次元に投影する際のズレによって生じます。例えば、橋を斜めから撮ると、遠くは小さく、近くは大きく写り、形が歪んで見えます。この歪みは、画像解析や変位測定に影響を与えるため、補正が重要です。特に橋のたわみなどを高精度に測定するには、評価点の位置が正確である必要があります。補正には、カメラの位置や角度、レンズ特性などを考慮した幾何学的処理が用いられます。

評価点の3次元変位と画素移動量の関係

図2は、鉄道橋りょうの測定対象とカメラの幾何関係です。橋りょう系のXYZ座標を線路方向をX（終点方を正）、線路直角方向をY、鉛直方向をZ（鉛直上向きを正）、カメラ系のxyz座標系を光軸をy、イメージセンサーの長軸をx、短軸をz、撮影画像系のpq座標系を定義します。橋りょう系のXYZ座標を、カメラ系のxyz座標系に変換するためには、①Z軸周りに ψ_0 回転（方位角）、②X軸周りに ϕ_0 回転（バンク角）、③Y軸周りに θ_0 回転（ピッチ角）の順番で操作を加えます。 l_g はカメラレンズから評価点までの距離、 l_f はカメラレンズからイメージセンサーまでの焦点距離です。評価点*i*が座標Aに位置しており、変位Dだけ移動した結果、レンズを通して2次元平面であるイメージセンサー上の座標aに射影されます。このときのイメージセンサー上の移動をd、撮影画像系のpq座標系における移動を δ と表記します。

サブピクセル推定

画像解析では、物体の位置や動きを「ピクセル単位」で捉えるのが一般的ですが、より高精度な解析には「サブピクセル推定」が必要です。これは、ピクセルより細かい単位で位置を推定する技術で、解像度を上げずに微細な動きを検出できます。例えば、物体が0.3ピクセルだけ動いたかどうかを見分けることが可能です。画像の輝度分布やエッジ形状を数学的に解析（本研究では2次曲面を使用）、隣接ピクセルの輝度の変化から位置を推定します。この技術は、工業検査、医療画像、天体観測、顔認識など、精密な位置情報が求められる分野で活用されています。

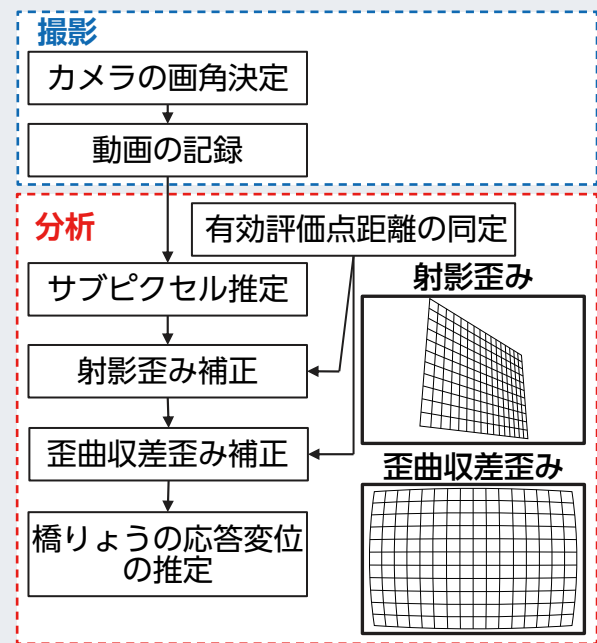
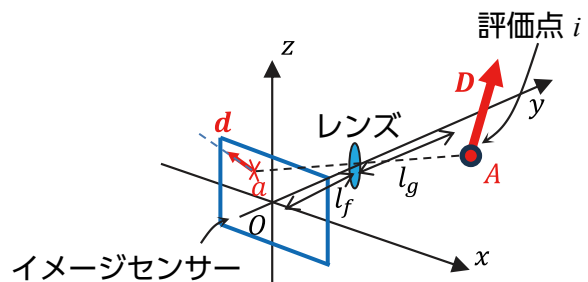
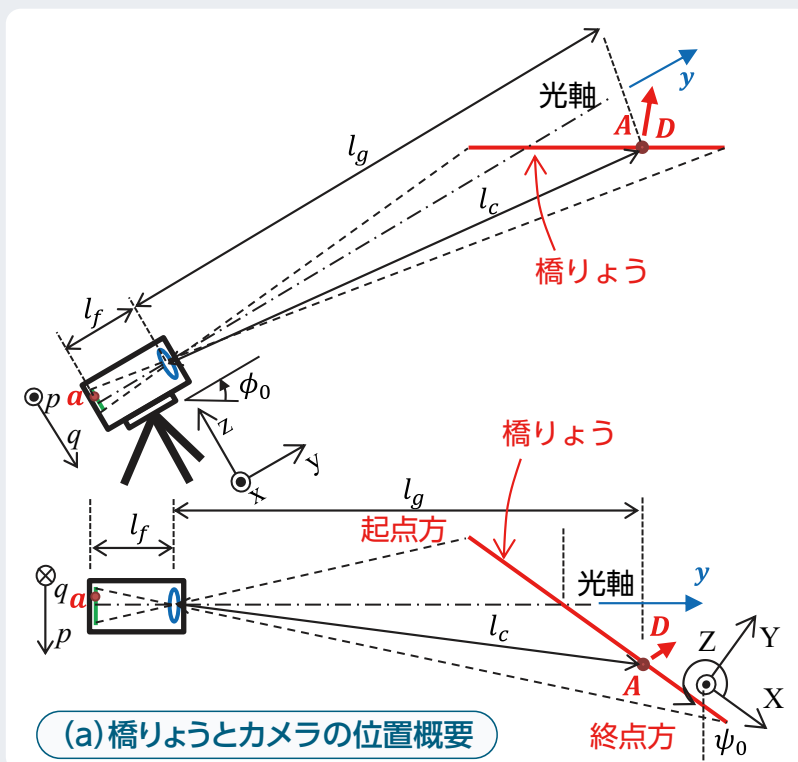
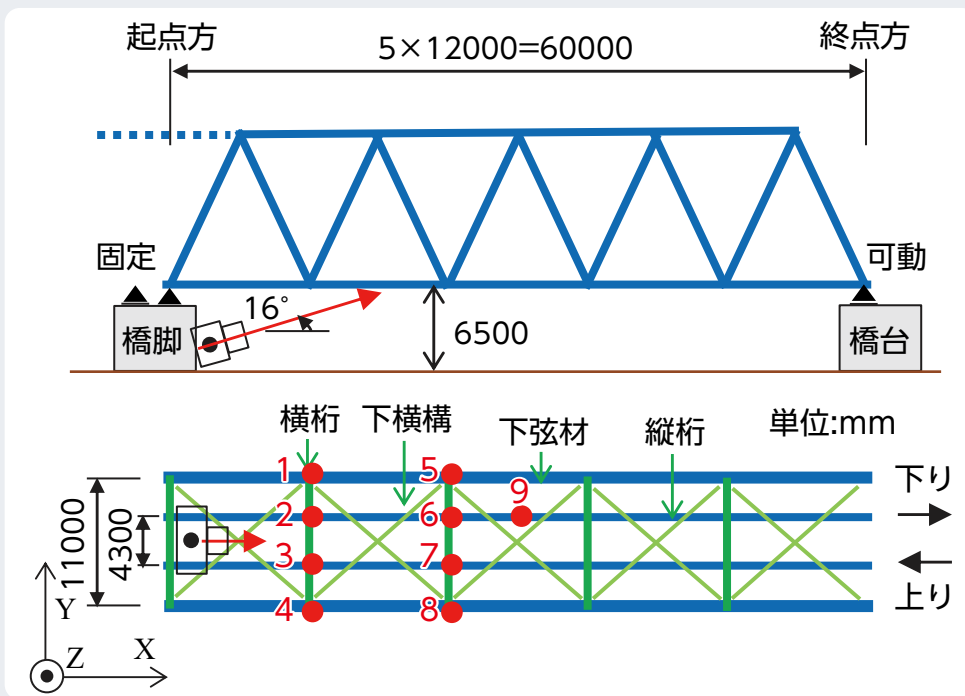


図1 撮影動画の処理フロー

図2 鉄道橋りょうの測定対象とカメラの幾何関係





(a) 橋りょうとカメラの位置概要



(b) 撮影画像

図3 橋りょうAの測定概要

橋りょうの変位 D の推定

2次元ベクトルである画素移動量 δ の観測値から、3次元空間上の評価点の3次元ベクトル D を推定することは一般的には不可能です。一方で、列車通過時の橋りょうの変位応答において、線路方向の変位の大きさは鉛直方向と比較して小さいという特徴があります。本研究では、線路方向の変位の影響が十分に小さくなる測定条件に基づき、2次元の橋りょう変位（水平、

鉛直）を推定します。具体的には、カメラを40度以下の仰角で設置し、評価点を撮影画像の下半分に配置することで、線路方向の変位を無視しても、誤差をおおむね10%以下に抑えることが可能です。

実橋りょうへの適用

図3は、提案方法を適用した実橋りょうAの橋りょうとカメラの位置関係および撮影画像で

す。橋りょうAはスパン60mの単純トラス橋です。列車荷重は縦桁、横桁を介してトラス主構、さらには支承へと伝達されます。カメラは起点側の橋脚付近に設置しました。撮影にはBlackmagic URSA Mini Pro OLPF 12K (解像度12288×6480ピクセル) を使用し、60fpsの条件で測定を行いました。評価点は、連結部のボルトやマンホール、角部など、エッジが明確な箇所9点を選定しました。

図4は、橋りょうAの各評価点における鉛直方向の変位です。10両編成の列車が下り線を277km/hで通過したケースを分析しました。本検討では、15Hz以下の成分のみを通過させるローパスフィルターを用いて、簡易的に高周波成分や地盤振動の影響を除去しました。

図から、列車通過に伴い、下り線側の縦桁（評価点6、9）において約3mm、上り線側の縦桁では約1.5mmのたわみが発生していることが確認できます。また、単純支持橋りょうであることから、スパン中央に近づくほどたわみが大きくなる傾向も見られます。このように多点同期計測により、部材ごとの変形形状の検討も可能になります。

図5は、提案方法の妥当性です。評価点6および9において、鉛直方向の変位および各評価点の差分変位を、Uドップラー²⁾と本提案の画像計測分析結果（提案法）で比較しました。図から、各評価点

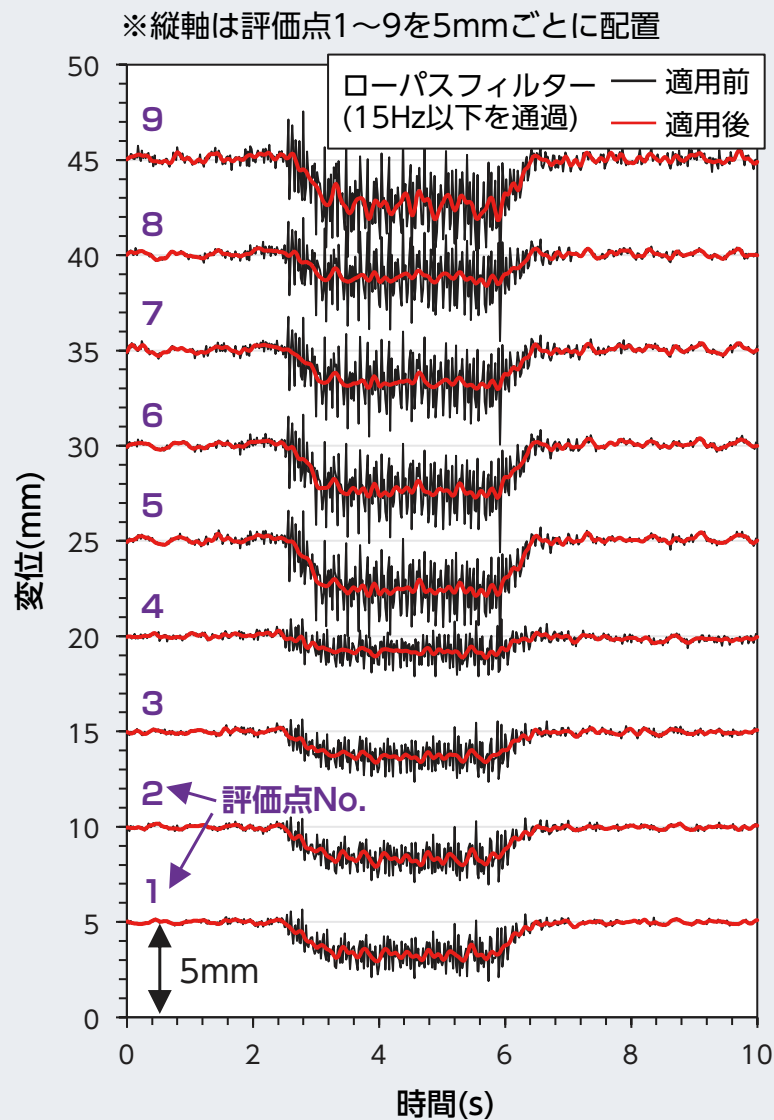
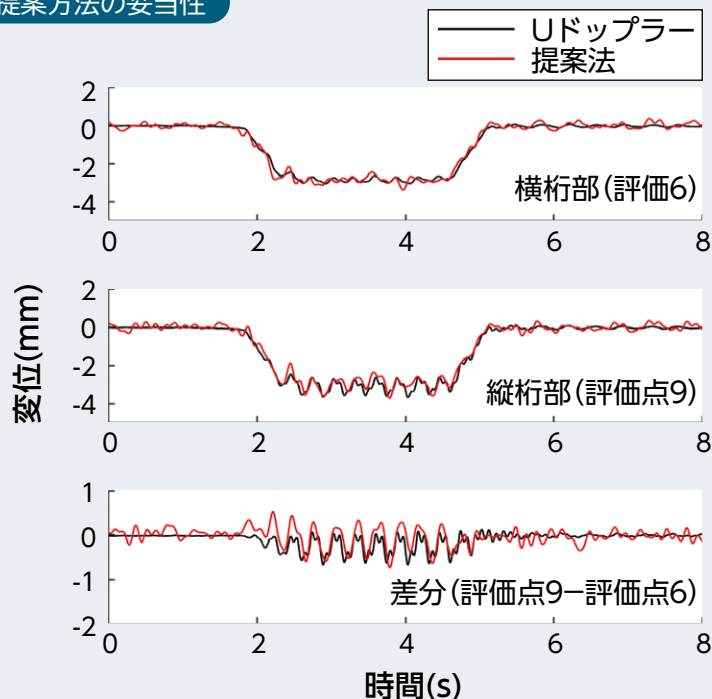
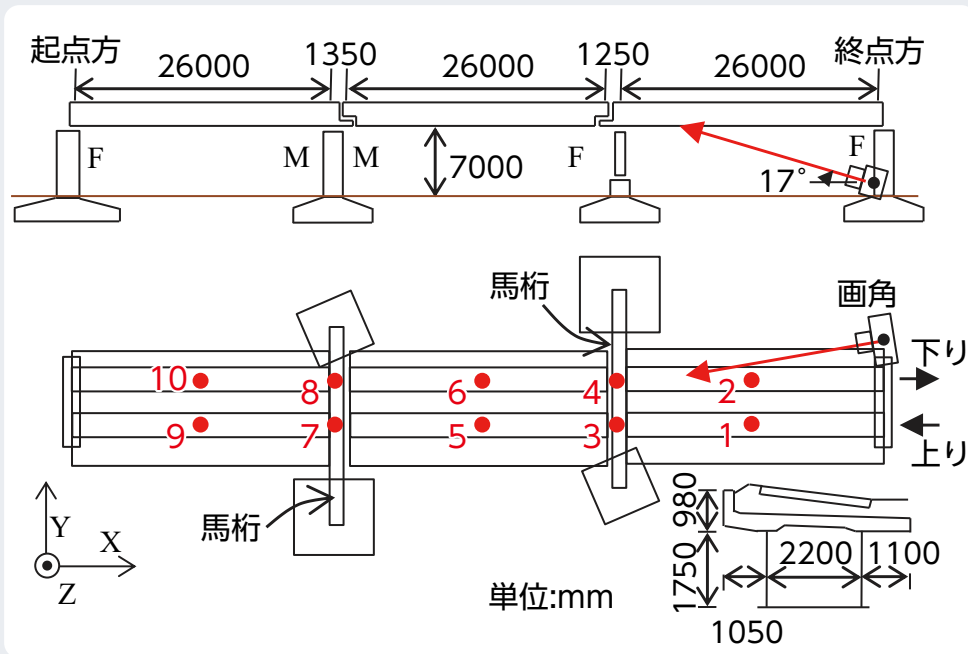


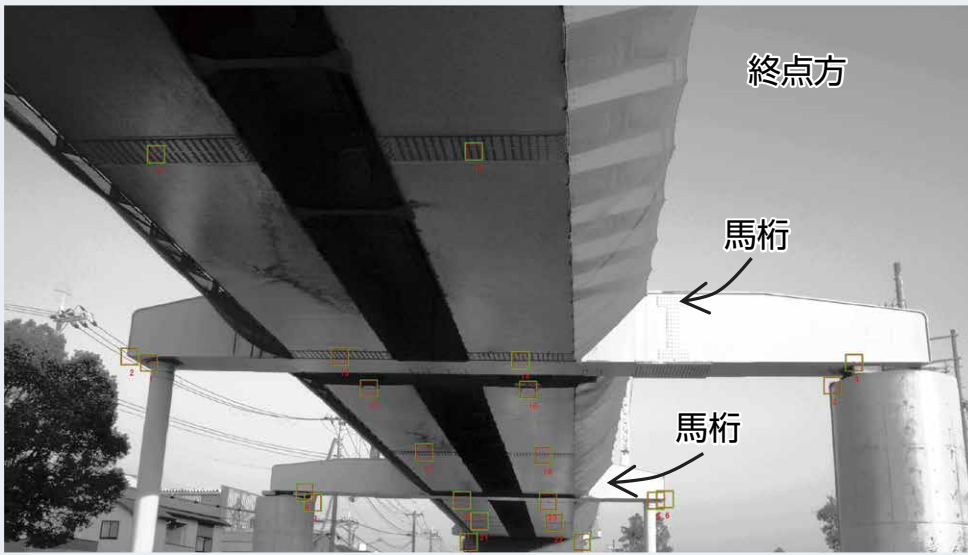
図4 橋りょうAの各評価点の鉛直方向の変位

図5 提案方法の妥当性





(a) 橋りょうとカメラの位置概要



(b) 撮影画像

図6 橋りょうBの測定概要

においてUドップラーと提案法の波形および最大たわみがおおむね一致しています。提案法では、列車通過前後の時間帯において、Uドップラーには見られない0.2～0.3mm程度のカメラの自己振動が確認されました。差分波形では、Uドップラーにより約0.6mmの縦桁たわみが観測されています。縦桁変位のように小さい変位を測定する場合にはノイズの混入が増加し、自己振動の影響が大きくなる傾向にあります。

図6は、橋りょうBの橋りょうとカメラの位置関係および撮影画像です。橋りょうBは、支間26mの3径間の馬桁を有する合成桁です。幹線道路と約45度の角度で交差するため、画像測定以外の方法の適用が困難でした。側径間の主桁はその一端が馬桁と一体化しており、馬桁は、一端がピン支点を有する鋼橋脚に、他端が可動支点を有するコンクリート橋脚に支持される複雑な構造を有しています。カメラは終

点側の橋脚の脇に設置しました。撮影には、Blackmagic Pocket Cinema Camera 6K（解像度6144×3456ピクセル）を使用し、50fpsの条件で測定を行いました。評価点は、連結部のボルトやマンホール、角部など、エッジが明確な箇所10点を選定しました。

図7は、橋りょうBの各評価点における鉛直方向の変位です。16両編成の列車が305km/hで上り線を通じたケースを分析しました。図から、列車通過に伴い変位振幅が大きくなる共振現象が発生しています。第2径間のスパン中央、馬桁部、第1・第3径間のスパン中央の順に変位が大きく、それぞれ約10mm、4mm、3mm程度の鉛直変位が発生しています。第2径間では、支点部（馬桁上）の変位が鉛直変位の約半分を占めており、馬桁の共振現象を誘発させる要因であることが判明しました。

おわりに

本稿では、鉄道橋りょうの多点同期変位測定を実現する技術を紹介しました。この技術により、1台の高解像度カメラにより広角撮影動画から橋りょう全体の変位挙動を考察することができます。特に、真正面からの撮影に限定しない斜め方向からの撮影による柔軟な設置条件を実現しました。今後は、地盤振動など外乱のキャンセリング手法の研究に取り組めます。

RRR

※縦軸は評価点1～10の変位波形を15mmごとに配置

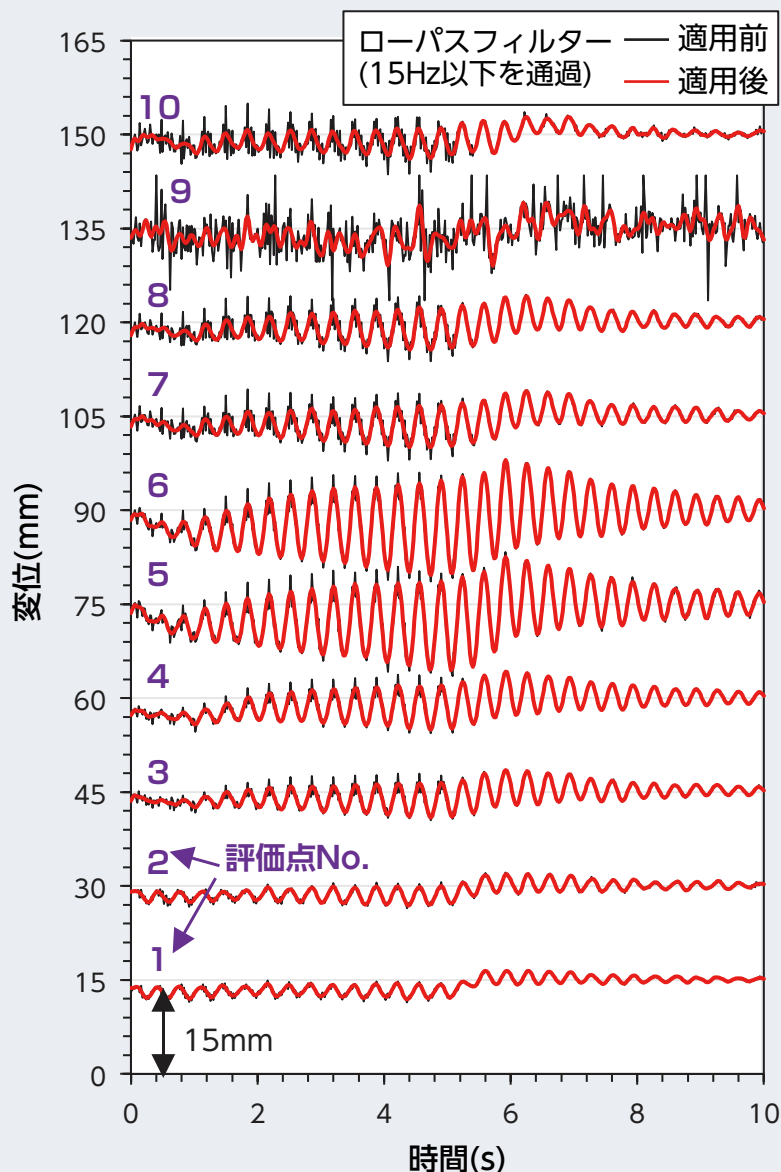


図7 橋りょうBの各評価点の鉛直方向の変位

文献

- 1) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限），丸善出版，2006
- 2) 上半文昭：構造物診断用非接触振動測定システム「Uドップラー」の開発，鉄道総研報告，Vol.21，No.12，pp.17-22，2007
- 3) 徳永宗正，北川晴之，池田学：高解像度カメラの広角測定を用いた鉄道橋りょうの列車通過時変位の多点同期測定によるモード同定，構造工学論文集 A，No.70，pp.289-302，2024