

車上計測された軌道変位に基づく  
共振橋りょうの桁たわみ推定法

松岡 弘大\* 服部 紘司\*

A Method for Estimating Bridge Girder Deflections Under Resonant Condition  
Based on Drive-by Measured Track Geometries

Kodai MATSUOKA Koji HATTORI

In some high-speed railways, considerable cost and labor are invested in-situ bridge deflection measurements to appropriately manage resonant bridges during train passage. In this study, we propose a method for estimating girder deflection of resonant railway bridges using drive-by measured track geometries. Analyzing the dynamic response of resonant bridges could show that the deflection is estimated from three peak values in the difference of track geometries between the first and last cars. Numerical simulations and field verification on a high-speed railway showed that the proposed method can accurately estimate maximum girder deflection, with an error margin of less than 0.5 mm.

キーワード：車上計測，共振橋りょう，軌道変位，高速鉄道，MCMC

## 1. はじめに

高速鉄道の橋りょうでは，列車通過時に大きい振動が生じる共振現象が問題となることがある．共振現象は，走行列車の規則的な軸配置に起因する加振振動数と橋りょうの固有振動数が近接することで発生する<sup>1)</sup>．これにより生じる橋りょう振動は橋りょう本体のひび割れ発生・進展<sup>2) 3)</sup>のほか，橋りょう上を走行する列車の乗り心地<sup>4)</sup>に影響する場合がある．また，橋りょう上の電柱の過大振動を誘発し，電車線設備の破損などに至った例<sup>5) 6)</sup>も報告されている．このため，古くから理論，実験，解析，および実測により現象の解明，設計法の整備<sup>7)</sup>が進められており，近年の高速鉄道では橋りょうの共振発生自体が問題となることはほとんどない．

ただし，過去に建設された一部の高速鉄道では，共振により増大した橋りょうの動的応答が乗り心地に影響する場合があり，特に深刻な場合には走行速度の減速や大規模な補強対策が実施される<sup>8)</sup>．また，このような路線では橋りょうの共振状態および対策要否を適切に把握するため，膨大な時間と労力を掛けて1橋りょうずつ列車通過時の桁たわみを地上から計測している．これまで，桁たわみ計測負荷を軽減するため，地上からの効率的な桁たわみ計測手法の研究開発<sup>9)</sup>のほか，橋りょう上を走行する車両上で計測したデータを活用した共振状態の橋りょうの検知手法<sup>10) 11)</sup>の開発が進められてきた．ただし，既存手法では通過した橋りょうが共振状態であったか否かしか判別できず，共振状態にある橋りょうの桁たわみ量は不明であった．このような状況から共振状態の橋りょうの桁たわみを車上計測データに基づき推定する方法の実現は実務的な要請が高い．

車上計測された軌道変位に基づく桁たわみ推定法についても研究が進められている．走行車両上で車上計測された2つの軌道変位の差分最大値が地上から計測される桁たわみ最大値と比例することが理論的に導き出され，これを利用した軌道変位の差分からの桁たわみ推定法が提案された<sup>12)</sup>．ただし，静力学理論に基づく当該手法は，列車通過時に動的応答が卓越する共振状態の橋りょうには適用できない<sup>13)</sup>．共振状態

\* 鉄道力学研究部 構造力学研究室

の橋りょうの桁たわみ推定には、既存手法で考慮されていない橋りょうの動的応答を考慮した新たな方法論が必要となる。

以上を踏まえ、本研究では車上計測された軌道変位に基づく共振状態の橋りょうの桁たわみ推定法の構築を試みる。なお、本研究でも既往研究<sup>12) 13)</sup>と同様に先頭および最後尾車両で計測された軌道変位の差分を利用する。これにより、両者で共通するレール凹凸など橋りょう変形以外の軌道変位の影響を除去する。まず、差分処理により抽出される最後尾車両の軌道変位における橋りょう動的応答成分の理論的分析<sup>14)</sup>により、共振状態と軌道変位ピークとの関係を明らかにする。そのうえで、共振状態の橋りょうの桁たわみ評価に必要なパラメータ(固有振動数とモード減衰比)を軌道変位の差分から推定する方法<sup>14)</sup>を構築する。なお、本研究では、走行列車の加振周期と橋りょうの固有振動数が一致する一般的な共振に加え、両者が多少異なりうなりが生じる共振に近い状態も含めて共振状態と呼ぶ。

## 2. 橋りょう動的応答の理論分析

ここではまず走行車両上の任意箇所に設置した軌道検測装置により計測される軌道変位として共振状態の橋りょうの変位を観測した場合について簡易な理論を用いて分析する。

図1に示す列車車軸(車両長 $L_c$ )と同じ配置の移動荷重列が単純支持梁上を走行する際の梁(支間長 $L_b$ , 曲げ剛性 $EI$ , 単位長質量 $\bar{m}$ , モード減衰比 $\xi$ )の挙動を考える。移動荷重の大きさはすべて同じ $P$ , いずれも速度 $v$ で図中左から右へ移動する。モード座標系に変換した際の1次たわみモードのモード変位 $z_{b,1}$ は質量基準化されたモード外力 $f_1$ , 梁の固有円振動数 $\omega_{b,1}$ , モード減衰比 $\xi_{b,1}$ により以下の式(1)となる。

$$\frac{\partial^2 z_{b,1}}{\partial t^2} + 2\xi_{b,1}\omega_{b,1} \frac{\partial z_{b,1}}{\partial t} + \omega_{b,1}^2 z_{b,1} = f_1 \tag{1}$$

ここでモード外力 $f_1$ を車両長周期の調和成分とそれ以外の定常成分に分離する。

$$f_1 = f_{1,d} + f_{1,s} \tag{2}$$

ここで、調和成分 $f_{1,d} = A_f \exp(i\omega_f t)$ であり、 $A_f$ は調和成分 $f_{1,d}$ の振幅、 $\omega_f$ は調和成分 $f_{1,d}$ の変動の円振動数、 $i$ は虚数単位である。 $f_{1,d}$ は車軸が密集する車両連結位置が支間中央に位置する度に極小(すなわち、1車両長で1周期)となるため、車両長 $L_c$ と列車速度 $v$ から $\omega_f = 2\pi v/L_c$ となる<sup>14)</sup>。式(1)のモード変位 $z_{b,1}$ のうち調和成分 $f_{1,d}$ に対応する変位成分 $z_{b,1}^d$ に着目すると、橋りょう応答が定常状態であるため、図1に示すように調和成分 $f_{1,d}$ に対する梁の変位成分の解を $B_f \exp(i\omega_f t)$ と仮定でき、

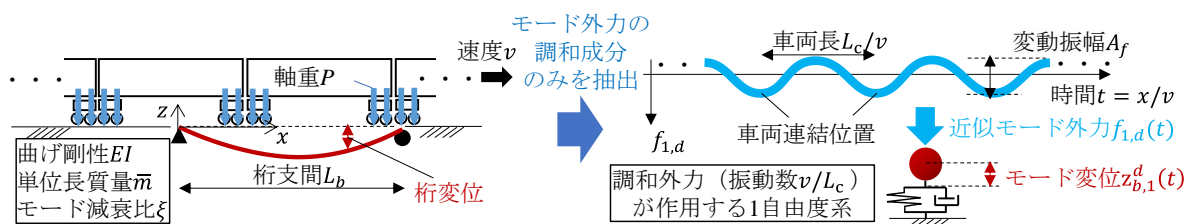


図1 理論分析モデルと橋りょう1次たわみモードの伝達関数モデル

$$B_f \left\{ \omega_{b,1}^2 - \left( \frac{2\pi v}{L_c} \right)^2 + 2i\xi_{b,1}\omega_{b,1} \frac{2\pi v}{L_c} \right\} = A_f \quad (3)$$

の関係が得られる。ここで、モード外力の調和成分作用時の準静的な変位振幅 $A_f/\omega_{b,1}^2$ に対する動的応答振幅 $B_f$ の比である伝達関数 $G$ は $\omega_{b,1}^2 B_f/A_f$ となる。加振周期が列車速度 $v$ の関数であるため、伝達関数は列車速度 $v$ の関数として式(4)および(5)により表現できる<sup>14)</sup>。

$$|G(v)| = \left( \sqrt{\{1 - (\beta v)^2\}^2 + (2\beta\xi_{b,1}v)^2} \right)^{-1} \quad (4)$$

$$\angle G(v) = \tan^{-1} \left( \frac{2\beta\xi_{b,1}v}{1 - (\beta v)^2} \right) \quad (5)$$

ここで、 $\beta = 2\pi/\omega_{b,1}L_c$ である。式(5)の位相遅れを加振円振動数 $\omega_f$ により距離遅れに変換すると式(6)となる、

$$dG(v) = \frac{L_c}{2\pi} \tan^{-1} \left( \frac{2\beta\xi_{b,1}v}{1 - (\beta v)^2} \right) \quad (6)$$

調和成分 $f_{1,d}$ に対する変位成分 $z_{b,1}^d$ を物理座標系に戻したうえで、 $\omega_f = 2\pi v/L_c$ について $vt = x$ 、車両連結位置が梁に進入する時点を $t = 0$ とすれば、橋りょう動的変位 $z_b^d(x)$ は

$$z_b^d(x) = B_f \sin(2\pi x/L_c + \theta) \sin(\pi x/L_b) \quad (7)$$

$(0 < x \leq L_b)$

と表すことができる。式(7)は橋りょう上を走行する車両連結位置から観測した場合における共振状態の橋りょうの動的応答を示し、車両長を波長とする波と支間長の半波長とする波（1次モードのモード形）の掛け合わせで表現されることがわかる。なお、 $\theta$ は調和外力 $f_{1,d}$ に対する橋りょう動的応答の位相と検測装置位置と車両連結位置の距離 $L_i$ から定まり、以下の式(8)で表すことができる。

$$\theta = \frac{2\pi}{L_c} \left( dG(v) - \frac{L_b}{2} - \frac{L_c}{2} + L_i \right) \quad (8)$$

図2に式(4)および(6)で計算した、モード外力の調和成分に対する橋りょう1次たわみモードの伝達関数（車両長25m、固有振動数2.5Hz、モード減衰比2%）を示す。距離遅れは調和成分 $f_{1,d}$ に対する橋りょうの変位成分 $z_{b,1}^d$ の位相遅れを車両走行距離で表したものである。距離遅れ0の場合、同位相となり、車両連結位置が支間中央に位置する調和外力 $f_{1,d}$ 極小のタイミングで桁の変位成分 $z_{b,1}^d$ も極小（下側ピーク）となる。一方で完全な共振状態（ $\omega_f = \omega_{b,1}$ ）の場合（図2では共振速度225km/hの場合）、変位成分 $z_{b,1}^d$ は調和成分 $f_{1,d}$ に対して $\pi/2$ だけ遅れるため、遅れ距離は $L_c/4 = 25/4 = 6.25\text{m}$ となる。

図3には、この特徴を車上から観測した橋りょう動的応答として表した結果（式(7)）の計算例を示す。橋りょうは支間長30mとし、列車速度は共振速度および共振速度 $\pm 5\%$ とした。また、軌道検測装置の位置は実際と同じ最後尾台車中心から約3m車両中心側とした。いずれも橋りょう区間において、車両長25m

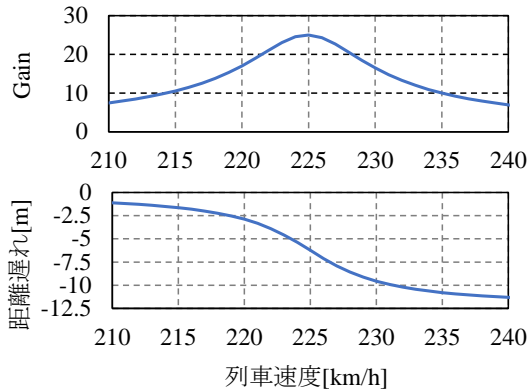


図2 モード外力に対する梁の伝達関数

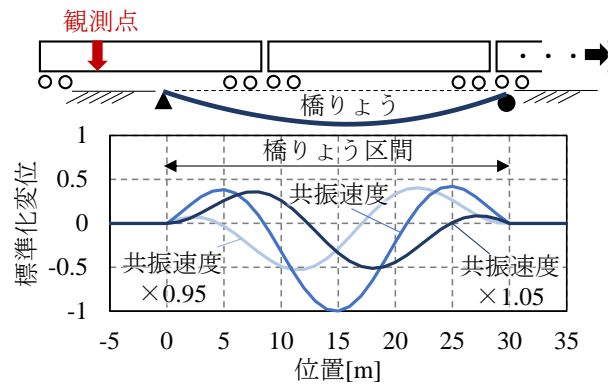


図3 車上から見た梁応答の理論解

の波と支間長 30m を半波長とする波の掛け合わせであることを確認できる。車上から観測した共振領域の橋りょうの動的応答は、共振速度において支間中央で極小値（下側ピーク）が生じ、共振速度よりも遅いもしくは速い列車速度の場合に、共振状態に応じた距離遅れの影響により、支間中央から進入側もしくは退出側にそれぞれ極小値がシフトする。したがって、列車速度と共振速度の差、すなわち橋りょう固有振動数、が下側ピークの位置（位相）に反映される。

なお、下側ピークの振幅は主にモード減衰比に支配される。共振状態の橋りょうの動的応答は、固有振動数とモード減衰比に支配されることから、共振状態の橋りょうで計測された軌道変位の下側ピークの振幅と位置がこれら 2 つのパラメータと対応する。ただし、伝達関数の位相はモード減衰比の影響を受けるうえ、ピーク位置は軌道変位の位置同期誤差にも影響を受けるため、ピークの振幅と位置から橋りょうの固有振動数とモード減衰比を一意に算出することは難しい。この点を考慮した桁たわみ推定法について次章で検討した。

### 3. 軌道変位差分に基づく桁たわみ推定法

#### 3.1 軌道変位の観測値と計算値

観測データとして、軌道管理の実務でも利用される 20m 弦正矢軌道変位の利用を前提とする。また、先頭および最後尾車両位置で観測される 20m 弦正矢軌道変位の差分をとること（以下、単に軌道変位差分と呼ぶ）で、静的軌道変位成分や橋りょうの準静的な桁たわみ成分を消去できる。加えて、橋りょうの共振現象による列車通過とともに徐々に増大する動的応答成分は差分により抽出できる。

逆解析の基本モデルとして式(1)および(2)で示した橋りょうを単純支持梁、列車を移動荷重列としたモデルを利用した。解析モデルの入力パラメータは、列車速度 $v$ 、車両数 $N_w$ 、軸重 $P$ 、橋りょう 1 次曲げモードのモード質量 $m_1$ 、固有振動数 $n_{b,1}$  ( $n_{b,1} = \omega_{b,1}/2\pi$ )、モード減衰比 $\xi_{b,1}$ 、支間長 $L_b$ 、および解析に考慮する次数である。なお、次数は過去の研究<sup>5)</sup>を参考に 3 次とした。これらのパラメータを入力したうえで式(1)の数値積分により列車通過時の橋りょう応答が得られる。入力パラメータのうち、列車速度 $v$ は車上で軌道変位とともに計測される。車両数 $N_w$ 、軸重 $P$ 、支間長 $L_b$ 、単位長質量 $m_1$ は仕様・設計値等を利用できる。なお、2 次以上の固有振動数は単純支持梁の理論により 1 次の値から一意に与えることができる<sup>5)</sup>。また、2 次以上のモード減衰比は 1 次と同様とした。したがって、未知パラメータは固有振動数 $n_{b,1}$ とモード減衰比 $\xi_{b,1}$ のみとなる。これら 2 つの未知パラメータを $\theta = [n_{b,1}, \xi_{b,1}]$ と記載する。

観測値と比較するためには数値解析により得られた橋りょう応答から軌道変位差分を計算する必要がある

る。本研究では先頭および最後尾車両で軌道変位を計測する場合を想定し、慣性正矢軌道検測装置の設置位置における橋りょう応答を算出したうえで実測軌道変位と同様に 0.25m 間隔の距離系列に変換した。また、実測と同様の処理により 20m 弦正矢軌道変位に変換し、先頭と最後尾の位置を同期させたうえで差分を取ることで軌道変位差分の計算値  $dI$  を得た。この計算過程を、未知パラメータ  $\theta$  を入力し、軌道変位差分  $dI$  を出力するシステムと考え、式(9)で表現する。

$$dI = G(\theta) \tag{9}$$

このとき、共振状態の橋りょうにおける桁たわみの推定問題は、計算により得られる軌道変位差分  $dI$  と観測される軌道変位差分との誤差を最小とする  $\hat{\theta} = [\hat{n}_{b,1}, \hat{\xi}_{b,1}]$  を求める問題に帰着する。

### 3.2 評価点の設定

つぎに上記の未知パラメータを軌道変位差分から推定するための評価点を設定する。軌道変位差分の計測波形と実測波形の差を直接計算する場合、高い位置同期精度が要求される。精度が不十分な場合、原理的に軌道変位差分波形の勾配の大きい箇所では誤差が増大する。一方、固有振動数やモード減衰比を特徴付けるのは、軌道変位差分の下側ピーク（勾配 0）の振幅と位置である。これを踏まえ、軌道変位差分波形の勾配の大きい箇所は推計に利用せず、軌道変位差分の下側ピークのみを利用することが考えられる。軌道変位差分に見られる下側ピークはその振幅と位置が固有振動数とモード減衰比に対応する。ただし、位置合わせ精度が不十分な場合には、下側ピークの位置の推定誤差も増大してしまう。このため、軌道変位差分の下側ピーク位置の推定を別の上側ピークの振幅の推定で代替することを考える。具体的には支間中央付近の下側ピークに加え、前後の 2 つの上側ピークの計 3 点の振幅を評価点とする。図 4 に式(9)により算出した共振状態の橋りょう上で観測される軌道変位差分と 3 つの評価点を示す。前後の 2 つの上側ピークの振幅は共振速度と列車速度の差により大小関係が変化する。これは共振速度からの乖離による遅れ距離に加え、橋りょう区間における軌道変位差分の波形が橋りょうモード形の影響を受けて支間中央で最大、支点部で最小となることに起因する<sup>14)</sup>。すなわち、下側ピークが橋りょう退出側にずれる場合（共振速度  $\times 1.05$ ）、前半の上側ピーク 1 は支間中央に、後半の上側ピーク 2 は橋りょう退出側にそれぞれ移動するため、上側ピーク 1 の振幅は大きく、上側ピーク 2 の振幅は小さくなる。この特徴から 2 つの上側ピークの振幅を含めて推計することで、下側ピーク位置のシフトを代替的に評価できる。

以上の条件のもと、軌道変位差分の 3 つのピーク振幅を指標として、実測値と計算値の誤差が最小となる固有振動数とモード減衰比を数値的に求める。推計にはベイズ推計法の一つであるマルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC 法)<sup>15)</sup> を用いた。詳細については文献 14 を参照されたい。推計された固有振動数とモード減衰比を梁モデルのパラメータに設定し、移動荷重解析を行うことで桁たわみが推計される。

### 3.3 数値解析による検証

数値解析による推計手法の検証を行った。移動荷重列は 12 両編成の新幹線車両を想定し、列車速度はいずれのケースも 260km/h とした。橋りょうは共振が生じやすい支間長 25m とし、単位長質量は 25t/m、モード減衰比は 2.5% とした。固有振動数は列車走行速度 (260km/h) が共振速度となる 2.9Hz を基本とした。以上の条件で得られた軌道変位差分、列車速度、橋りょう支間長および単位長質量を入力とし、固有振動数とモード減衰比、および軌道変位差分と桁たわみ最大値を推計した。

図 5 上部に軌道変位差分の推計過程を示す。10 回目の推計過程における軌道変位差分は正解値との乖離

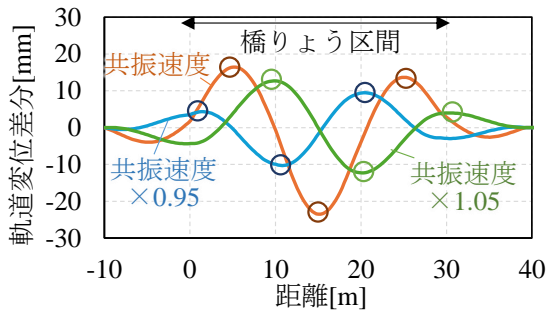


図4 軌道変位差分の3つのピークの特徴

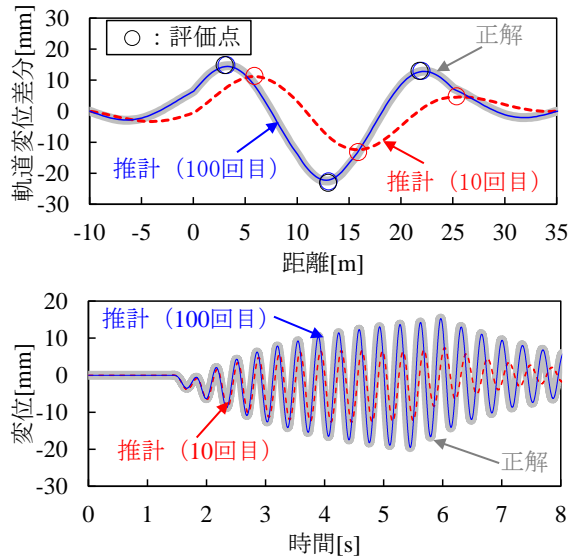


図5 数値解析での検証結果（支間長 25m）

が見られるが、推計計算を繰り返すことで100回目の推計結果では正解と良好に一致する。また、3点の評価点のみで軌道変位差分のピーク値だけでなくピーク位置も正解値に合うよう更新されており、支間中央付近の極小値に加え、その前後の極大値を用いることでピーク位置を代替的に推定できることがわかる。図5下部は軌道変位差分を介して推計した桁たわみの推計過程を示す。軌道変位差分と同様に10回目のサンプリング時の桁たわみは正解値と乖離が大きいですが、100回目には桁たわみの推計波形は正解波形と精度よく一致する。したがって、少なくとも数値解析の条件下では、提案手法により共振状態の橋りょうの軌道変位差分から、3点の評価点が合うよう固有振動数とモード減衰比を推計することで桁たわみを推計できることがわかる。以上の数値解析による検証を支間長25mおよび50mの桁で実施した。また、共振速度だけでなく共振速度の±5%および±10%の場合についてもそれぞれ検証した。その結果、固有振動数は誤差1%以内、モード減衰比は誤差40%以内、桁たわみは誤差10%以内で正解値を推計できることを確認している<sup>14)</sup>。なお、桁たわみ推計誤差が増大するのは共振速度-10%の場合で、うなり現象により最後尾車両通過時の動的応答が減少することに起因する<sup>14)</sup>。これを除けば、桁たわみ推定誤差は最大でも2%程度であり、十分な精度を有することを確認している。

## 4. 実路線での検証

### 4.1 検証条件

列車通過時に橋りょうの共振が報告された新幹線を対象とし、当該路線における先頭および最後尾車両での軌道変位計測を実施し、4橋りょう上の軌道変位差分に提案手法を適用した。また、対象4橋りょうにおいて当該車両通過時の桁たわみをUドップラー<sup>16)</sup>により地上から同時計測し、提案手法により推定された桁たわみ最大値と比較することで推定精度を検証した。

軌道変位は12両編成営業列車の先頭と最後尾車両に設置された車体装架型の慣性正矢軌道検測装置<sup>17)</sup>により計測され、20m弦正矢軌道変位に変換される<sup>14)</sup>。対象橋りょうは、これまでの検査により共振が確認された橋りょうA~Dの4橋りょうとした。橋りょう形式はいずれも同じで、支間長29.2m、橋長30m、桁高1.9mのポストテンション式単純T形4主桁（複線桁）である。図6に断面図を示す。同形式の別の橋りょうでは大規模な補強事例<sup>8)</sup>も存在し、共振現象が維持管理上の課題となっている代表的な橋りょう形

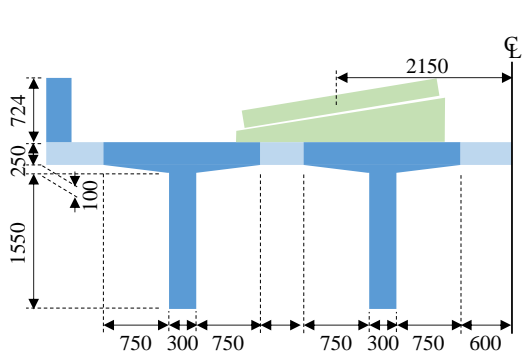


図6 橋りょう断面図（支間長 29.2m）

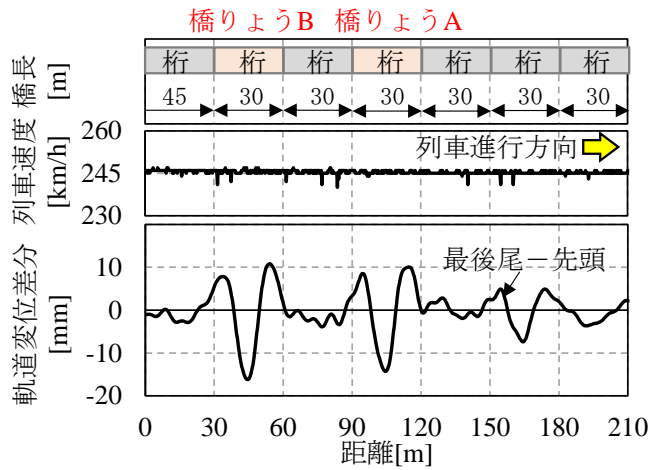


図7 橋りょうAおよびB区間の車上計測データ

式である。

図7に当該路線のうち橋りょうAおよびBを含む約200mの区間で計測された列車速度，および先頭と最後尾車両の軌道変位差分を示す。最上段に構造物情報として構造物種別（桁）および橋長を示す。2段目は，列車が図中左から右へ速度約247km/hで走行したことを示す。最下段は最後尾車両の軌道変位から先頭車両の軌道変位を引いた軌道変位差分を示す。橋りょうAおよびBでは軌道変位差分に振幅20mm以上の変動が確認できる。これらの変動における支間中央付近の下側ピーク，その前後の上側ピークは理論分析結果と良好に一致する。

#### 4.2 推計結果

軌道変位差分のうち各橋りょう区間の前後5m分を含めた40m分に提案手法を適用した。橋りょう諸元はいずれも設計計算値に基づき支間長29.3m，単位長質量24.6t/mとした。固有振動数とモード減衰比の初期値は2.9Hzおよび2.0%とした。MCMC法でのサンプリング回数は5000回とし，初期500回をバーンインとして除去した4500回を事後分布からのサンプルとした。

図8に橋りょうAの推計過程における軌道変位差分および桁たわみの推計結果の推移を実測値とともに示す。上段に固有振動数とモード減衰比の推移を，中段および下段に代表的な回数（1，50，および500回目：図中a～c）における推定軌道変位差分，桁たわみを示す。aとして示す1回目の推定軌道変位差分は実測と比較して振幅が小さく，3つの評価点のうち2つが大きく異なっている。サンプリングを繰り返すことにより，軌道変位差分の推計結果は徐々に実測値に近づいていく。cとして示す500回目には推計軌道変位差分の下側ピークは実測値とほぼ同じ値となる。パラメータの収束に合わせ，桁たわみ波形も実測として示す地上からの計測波形に近づいていく。軌道変位差分の更新では，b：50回目で極小値のみが一致しているが，桁たわみ波形ではb：50回目の推計時点ですでに最大変位が実測値と概ね一致する。ここからc：500回目までで推計された桁たわみ波形は大きく変動せず，いずれも実測値と精度よく一致する。以上から，路線においても軌道変位差分を良好に再現できれば桁たわみ波形も高い精度で再現できること，車上計測された軌道変位差分の極小値を良好に再現できれば，少なくとも地上から計測された桁たわみ波形の最大変位を概ね評価できることを確認できる。

表1に各橋りょうで提案手法により推計した桁たわみ最大値と実測値の一覧，および各推計値を実測値で除した推計誤差を整理した。桁たわみ最大値の推計値は，橋りょうA：15.3mm（実測15.2mm），橋りょうB：13.8mm（実測14.2mm），橋りょうC：11.9mm（実測11.4mm），橋りょうD：9.4mm（実測9.7mm）

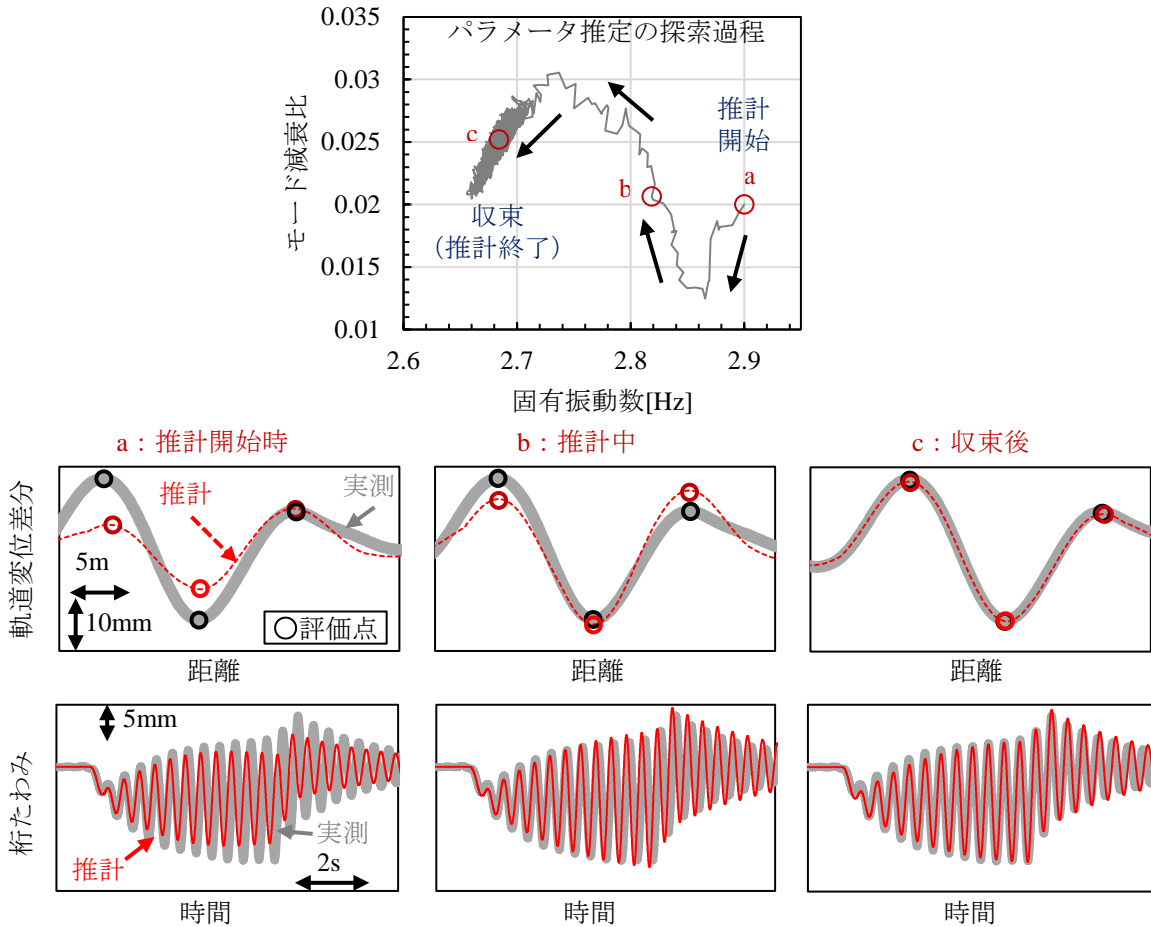


図8 推計過程における軌道変位差分・桁たわみ（橋りょうA，列車速度247km/h）

表1 桁たわみ推計結果と地上計測結果

橋りょう	推計値 [mm]	実測値 [mm]	推計値/実測値	列車速度 [km/h]	推計共振速度 [km/h]
A	15.3	15.2	1.009	247	241.4
B	13.8	14.2	0.973	235	241.3
C	11.9	11.4	1.040	255	244.0
D	9.4	9.7	0.965	245	258.0

であった。いずれの推計値も実測値と誤差 0.5mm 程度（5%）以内であり，良好な精度で共振状態の橋りよりの桁たわみ最大値を推計できていると言える。なお，同表に示す列車速度と推計共振速度の差異が大きいほどわずかではあるが誤差が増加する傾向が見られる。これは列車速度が共振速度からわずかにずれたことにより生じるうなりの影響と考えられる。ただし，このうなりの影響が生じる場合でも桁たわみ最大値の推計誤差は5%以下である。なお，本稿には示していないが，桁たわみ最大値の推計過程において各橋りよりの固有振動数およびモード減衰比についても得られていること<sup>14)</sup>を付記しておく。固有振動数やモード減衰比の推計結果の詳細については文献14を参照されたい。

### 4.3 提案手法の適用フロー

本研究の提案手法は共振状態の橋りょうに適用対象を絞っている。このため，軌道変位を車上計測した際に，どの橋りょうが共振状態にあるか事前に把握していることが前提となる。この点については，過去に開発された車上計測による共振状態の橋りょうの抽出手法<sup>10) 11)</sup>により解決できる。図9に既存の車上計

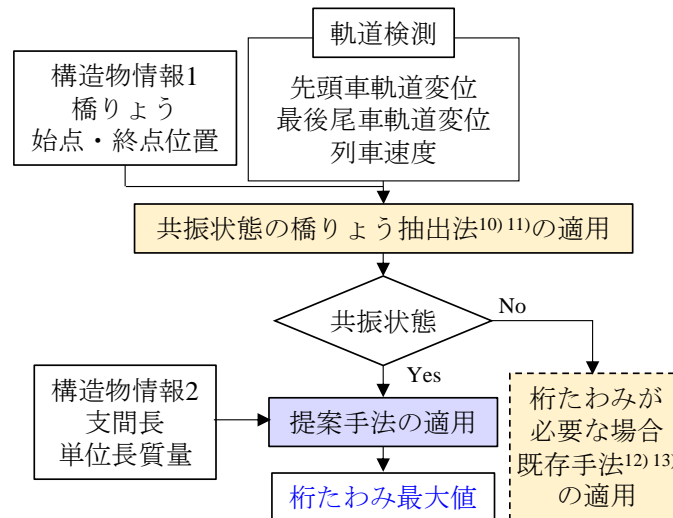


図9 既存手法と組み合わせた適用フロー

測手法も含めた提案手法の適用フローを示す。提案手法の適用に先立ち、すでに開発され実路線での有効性も検証されている共振状態の橋りょう抽出法を用いることで、本研究の前提条件である共振状態の橋りょうを選定できる。既存の共振状態の橋りょう抽出法では車上計測された先頭および最後尾車両の軌道変位を利用するため、軌道変位の車上計測はその後の本研究の提案手法の適用も含めて1度でよい。共振状態の橋りょうの抽出法では先頭と最後尾車両の軌道変位に波長25mを通過帯とするフィルタ処理を行ったうえで差分を計算することで、差分波形のピークから共振状態か否かを判定する。ただし、共振状態の橋りょうの桁たわみ最大値まではわからない。抽出法により選定された橋りょうを対象として本研究の提案手法を適用することで実務的要請の高い共振状態の橋りょうの桁たわみ最大値を得ることができる。

## 5. まとめ

本研究では、実務的に高い要請を有するもこれまで困難であった車上計測された軌道変位に基づく共振状態の橋りょうの桁たわみ推定法の構築を試みた。得られた知見を以下にまとめる。

- ・伝達関数を用いた列車通過時の単純支持梁の理論分析により、軌道変位として観測される共振状態の橋りょうの動的成分を定式化し、共振速度と列車速度との差異が橋りょう区間の軌道変位のピーク値と位相により表現できることを明らかにした。
- ・理論分析結果を利用し、先頭と最後尾車両で得られた橋りょう区間の軌道変位差分の3つのピーク振幅を用いて、MCMC法により橋りょうの固有振動数とモード減衰比を求めることで桁たわみ最大値を推計する方法論を提案した。
- ・数値解析での検証の結果、列車速度が共振速度と10%程度異なる場合にうなり現象によりモード減衰比の推計精度が低下するものの、共振速度±10%以内であれば桁たわみ最大値を誤差10%以内で推計できることを示した。
- ・実際の高速鉄道で車上計測された軌道変位差分に提案手法を適用した結果、推定された共振状態の橋りょうの桁たわみ最大値は、誤差0.5mm以内で地上計測結果と精度よく一致することを示した。

本手法は軌道管理のためにすでに営業列車に設置されている慣性正矢軌道検測装置<sup>17)</sup>、および軌道保守管理データベースシステムLABOCS<sup>18)</sup>に整備された構造物情報を利用でき、実導入に際した新たな設備投資が不要である。この点も踏まえ、現在一部路線での実用化への検討を進めている。ただし、実用化に際し

ては推計時の計算量も課題となる。1度の車上計測で数十の共振状態の橋りょうが検知された場合、本研究のMCMC法では少なくない計算時間を要する。解決策として、最尤推計などのより高速な推計法を用いる方法や、橋りょう種別を限定したうえでノモグラムを用いて評価を行う方法の構築があげられる。特に、実高速鉄道で桁たわみが課題となる橋りょう<sup>19)</sup>は限られるため、現在、ノモグラムの作成と検証を進めている。

## 文献

- 1) 松浦章夫：高速鉄道における橋桁の動的挙動に関する研究，土木学会論文報告集，No.256，pp.35-47，2013
- 2) Matsuoka, K., Tokunaga, M., Kaito, K., “Bayesian estimation of instantaneous frequency reduction on cracked concrete railway bridges under high-speed train passage,” Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 161, No. 107944, 2021.
- 3) 徳永宗正，池田学：鉄道 PRC 桁の複線同時載荷によるひび割れ進展に伴う動的応答増大の再現解析，土木学会論文集 A2 (応用力学)，Vol.77，No.2，pp. I\_467-I\_476，2021.
- 4) Sogabe, M., Furukawa, A., Shimomura, T., Iida, T., Matsumoto, N., Wakui, H.: Deflection limits of structures for train speed-up, Quarterly Report of RTRI, Vol. 46, No. 2, pp. 130-136, 2005.
- 5) Matsuoka, K., Tsunemoto, M., Tokunaga, M., “Dynamic behaviour of railway poles built on bridges under train passage in high-speed railways and a simple evaluation method,” Engineering Structures, Vol. 257, No. 114099, 2022.
- 6) 常本瑞樹，松岡弘大，薄広歩，高島将，以倉慶子，佐藤修平：列車通過時の高架橋振動に伴う電車線路設備損傷の現象説明と低減対策，電気学会論文誌 D (産業応用部門誌)，Vol.145，No.1，pp.9-19，2025
- 7) 曾我部正道，松本信之，藤野陽三，涌井一，金森真，宮本雅章：共振領域におけるコンクリート鉄道橋の動的設計法に関する研究，土木学会論文集，Vol. 724, pp. 83-102, 2003.
- 8) 松岡弘大，徳永宗正，荻原裕貴，築嶋大輔，後藤恵一：列車通過時における高速鉄道 PRC 桁の動的応答に対する支点追加補強の効果と適用範囲，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol. 76, No. 3, pp. 523-541, 2020.
- 9) 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. 15, pp. 7032, 2021.
- 10) 松岡弘大，川崎恭平，田中博文，常本瑞樹：高速鉄道車両の車体上下加速度を利用した車上からの共振橋梁の検知手法，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol.77，No.1，pp.146-164，2021
- 11) Matsuoka, K., Tanaka, H., Kawasaki, K., Somaschini, C., Collina, A., “Drive-by methodology to identify resonant bridges using track irregularity measured by high-speed trains,” Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 158, No. 107667, 2021.
- 12) 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，pp.22-15051，2023
- 13) Matsuoka, K., 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.
- 14) 松岡弘大，服部紘司：車上計測された軌道変位に基づく共振状態の橋りょう桁たわみ推定法，土木学会論文集，Vol.81，No.5，ID.24-00284，2025
- 15) 松岡弘大，曾我部正道，上半文昭，渡辺勉：列車通過時の単点加速度と梁の動力学モデルを用いた鉄道橋の動特性及び変位のベイズ推計，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol.72，No.3，pp.420-439，2016
- 16) 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
- 17) Tsubokawa, Y., Yazawa, E., Ogiso, K., Nanmoku, T., “Development of the car body mounted track measuring device with the inertial mid-chord offset method,” Quarterly Report of RTRI, Vol. 53, No. 4, pp. 216-222, 2012.
- 18) 吉田尚史，田中博文，西本正人：鉄道総研だより 軌道保守管理データベースシステム (LABOCS) Ver. 4.2 のリリースと新機能，新線路，Vol.74，No.10，pp.23-25，2020
- 19) Matsuoka, K., Tokunaga, M., Kaito, K. “Bayesian estimation of instantaneous frequency reduction on cracked concrete railway bridges under high-speed train passage,” Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 161, No. 107944, 2021.