独立成分分析による橋梁振動のブラインド逆畳み込み同定

Blind source deconvolusion of bridge vibration components using independent component analysis

大島義信*・小林義和**・山口隆司***・杉浦邦征**** Yoshinobu Oshima, Yoshikazu Kobayashi, Takashi Yamaguchi and Kunitomo Sugiura

*博士(工) 京都大学大学院助教, 工学研究科都市環境工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂) **博士(工)(株)ニチゾウテック技術コンサルティング事業本部 (〒551-0023 大阪市大正区鶴町2-15-26) ***博士(工) 大阪市立大学准教授 工学研究科都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138) ****Ph.D. 京都大学大学院助教, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

This paper reports on the blind source deconvolution of bridge vibration from the vehicle response using independent analysis. The vibration response of the vehicle passing a bridge may include bridge vibration. Thus herein, the eigenfrequecy of a bridge is estimated by the vehicle response using independent component analysis (ICA), based on the system model of a vehicle. A state space model and ARMA model is combined into system model for ICA algorithm. In the experiment, a vehicle with measurement system passes a simple beam bridge, together with a heavy vehicle. The responses of sprung and unsprung mass are analyzed by ICA to extract the bridge vibration component. As a result, it is found that adequate degree for ARMA model must be determined to obtain bridge eigenfrequency.

Key Words: Independent component analysis, bridge, vibration, blind deconvolution キーワード:独立成分分析、橋梁、振動、ブラインド逆畳み込み

1. はじめに

橋梁の健全性を合理的に評価する指標として、従来から 振動特性の変化に着目した研究が行われている 1233. これ らの手法の一つとして、橋梁上を走行する車両の振動応答 から、橋梁の固有振動数を推定する手法が提案されている 45). 原理的には、車両応答のスペクトル上に発生するピー クのうちで、通常の路盤走行時には発生せず、橋梁走行時 にのみ発生するものを橋梁の固有振動数とするものであ る. Yang らの研究では⁴, 牽引車両と重量車両を連行走行 させ、時速 40km の走行でも固有振動数が抽出可能である ことを示している. ここで彼らは、得られた車両応答を単 純に FFT 解析し、スペクトルの評価を行っている. これ は、車両振動と橋梁振動が十分に連成し、定常状態にある ことを前提としたものである. しかし, 橋梁上を通過する 車両とそれに励起される橋梁の振動は、過渡的な連成振動 であり、単純に定常状態を仮定することに疑問が残る. ま た彼らは、重心位置における振動応答を利用しているが、 車両自体も3次元的な連成振動をするため、多変量のモデ ルを想定することが望ましいといえる. またこの手法は, スペクトルに発生するピークのみに着目した手法である ため、明確なピークが現れない場合や、橋梁と車両の固有 振動数が近い場合など、検出に困難が生じる、このような 場合、近接する振動数を分離できる何らかの手法を適用す る必要がある.

一方、橋梁の振動解析には、運動方程式に基づく物理モデルが利用される場合が多い。物・物理モデルは、明確にモデルを構築できる反面、そこに含まれるパラメータを的確に設定する必要がある。特に、車両振動と橋梁振動の連成解析には、路面プロファイルや減衰定数など、不明確な要素が多く含まれ。第9、これらの数値を設定することが難しい。そのため、車両の振動応答から橋梁の振動成分を抽出する場合、不確定要素を多く含む物理モデルではなく、システムの入出力モデルに基づいた解析が有利となる。すなわち、橋梁の振動を入力とし、車両上の応答を出力とするシステムを想定することで、物理モデルを想定することなく、直接的に橋梁振動を評価することが可能となる。しかしこの場合、出力値のみから未知のシステム特性と入力値を同時に同定することになるため、通常の解析手法では同定が困難である。

他方,多入力多出力系の未知システムに対し,出力値の みからシステム特性と入力値を同定する手法に,独立成分 分析がある ¹⁰⁺¹²⁾.独立成分分析は,行列方程式で表される 入出力の線形的な混合モデルに対し,入力値が各々統計的 に独立であるという仮定の下,入力値を推定する手法であ る.この手法は,主に音声分離などの手法として研究が進 められており,いわゆるカクテルパーティ問題に対して威 力を発揮する ¹³¹⁴⁾.しかしこの手法は、各入力値の線形的

な重ね合わせを前提とするもので、入出力の関係が畳み込 みで表される振動問題に対し、直接適用することができな い. この問題はいわゆるブラインド逆畳み込み(Blind Deconvolustion)と呼ばれるもので、静的な混合推定を動的 な畳み込みに拡張する手法がいくつか提案されている. 代 表的な手法として、短時間 FFT を利用し、周波数領域で 畳み込み積分を線形和に変化する手法がある ¹⁵. しかしこ の手法は、音声などの広帯域の現象には有利であるが、振 動現象のような特定の帯域に波動が集中する場合、適切な 手法とはならない、これに対し新田ら16177は、動的な混合 に対して多変量 ARMA モデルと状態空間モデル (システ ム状態モデル)を適用し、静的な混合への変換に成功して いる。この場合、周波数領域を用いないため帯域に制約が なく、車両と橋梁の連成振動の解析に適用が可能と考えら れる。またこの手法は、単純な振動系において適用された 事例18)はあるが、車両橋梁の連成振動などの複雑な振動系 への適用性は検討されていない、既往の研究では、定常状 態にある低次数の系を対象としており、比較的理論解と合 致しやすい. しかし、本研究のように ICA を非定常で複 雑な系に適用した場合, 理論通りの解が得られるとは限ら ず, 実験結果に基づく検討の余地がある.

よって本研究では、橋梁上を通過する車両の振動応答から橋梁の振動成分を抽出する手法として、車両のシステム 状態モデルによる独立成分分析の適用を行い、実橋梁での 車両走行実験の結果に基づきその適用性を検討する.

2. 車両の振動応答に基づく橋梁の固有振動数推定法

2.1 概要

本研究では、橋梁と連成振動を生じている車両(計測車両)の振動応答に着目し、計測車両の振動応答から橋梁の固有振動数を推定する. Yang らの研究⁴では、計測車両として牽引車両を用いているが、本研究では普通乗用車を用いる. また応答値として、各車輪バネ下およびバネ上の加速度応答を計測する. ここで、バネ上とはバネ上質量を指し、サスペンション上の車体の位置を意味する. またバネ下とはバネ下質量を指し、車体とサスペンションで連結された各車輪軸の位置を意味する. これらの応答値をシステムの出力値として、独立成分分析により入力値としての橋梁振動の推定を行う.

2.2 想定する入出力システム

本研究では、車両を一つの多入力多出力システムとして 捉え、定式化を行う。前述の通り、出力値は各車輪のバネ 上バネ下加速度を用いる。また入力値として、橋梁構造全 体の振動成分と路面プロファイルによる振動成分を想定 する。想定するモデルの概念図を図-1 に示す。ここでは、 橋梁からの入力成分を4つとし、いずれかの成分に橋梁の 振動成分が含まれ、残りの3成分は路面プロファイルによ る振動成分と考える。正方行列を利用する本推定理論では、 出力と同じ数の入力を想定する必要があるため、入力の数 を4とした。また理論上、入力成分の数に応じて独立成分 の数が決まるが、想定する独立成分の数にかかわらず抽出した成分の独立性が確保されているため、入力数が推定精度に与える影響は少ないと考えられる。ただし、推定信号の独立性が低い場合、両者が混合された形で推定されてしまう。また独立成分分析の性質上、推定された信号は順序と振幅が不定となる。そのため本研究では、推定された信号を周波数解析し、どの成分に対しても、明確に 3~5Hz付近にピークを含んだ場合、そのピークを橋梁の卓越振動数とみなすことにする。

いま、離散時刻 $t(=t_1,t_2\cdots,t_N)$ での車輪 i(=1,2,3,4) におけるバネ上加速度応答を y(t), バネ下加速度応答を x(t)とする. さらに、橋梁からの入力成分を u(t)(j=1,2,3,4) とする. このとき、バネ下における入出力関係を、多次元 ARMA モデルとして式(1)のように仮定する.

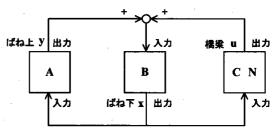


図-1 システムの概念図

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{k=1}^{p} \mathbf{A}(k)\mathbf{y}(t-k) + \sum_{k=1}^{q} \mathbf{B}(k)\mathbf{x}(t-k)$$
$$+ \sum_{k=1}^{r} \mathbf{C}(k)\mathbf{u}(t-k) + \mathbf{N}\mathbf{u}(t)$$
(1)

ただし.

$$\mathbf{y}(t) = \begin{pmatrix} y_{1}^{T}(t) & \cdots & y_{4}^{T}(t) \end{pmatrix}^{T} \in R^{1 \times 4}$$

$$\mathbf{x}(t) = \begin{pmatrix} x_{1}^{T}(t) & \cdots & x_{4}^{T}(t) \end{pmatrix}^{T} \in R^{1 \times 4}$$

$$\mathbf{u}(t) = \begin{pmatrix} u_{1}^{T}(t) & \cdots & u_{4}^{T}(t) \end{pmatrix}^{T} \in R^{1 \times 4}$$

$$\mathbf{A}(k) = \begin{pmatrix} a_{11}(k) & \cdots & a_{14}(k) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{41}(k) & \cdots & a_{44}(k) \end{pmatrix} \in R^{4 \times 4}$$

$$\mathbf{B}(k) = \begin{pmatrix} b_{11}(k) & \cdots & b_{14}(k) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{41}(k) & \cdots & b_{44}(k) \end{pmatrix} \in R^{4 \times 4}$$

$$\mathbf{C}(k) = \begin{pmatrix} c_{11}(k) & \cdots & c_{14}(k) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{41}(k) & \cdots & c_{44}(k) \end{pmatrix} \in R^{4 \times 4}$$

$$\mathbf{N} = \begin{pmatrix} n_{11} & \cdots & n_{14} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ n_{41} & \cdots & n_{44} \end{pmatrix} \in R^{4 \times 4}$$

である。また、次数p,q,r はあらかじめ与えられているものとする。この式は、バネ下の出力が、自分自身のフィードバックと、バネ上の成分と路面(橋梁)からの各成分の入力により生じていることを表している。

以上の定式化により、与えられた命題は、8つの観測値

x(t), y(t)のみから、未知の係数行列 A, B, C, N および入力値 u(t)を推定する問題となる。本研究では、独立成分分析により u(t)を推定した後、周波数解析を行い、橋梁の固有振動数を決定する。

2.3 独立成分分析による推定

(1) 静的混合における独立成分分析

独立成分分析は、複数の出力から、未知の伝達関数行列と未知入力を推定する手法である. いま、n個の入力源 s(t)が、混合行列 A により混合され、n 個の出力信号 x(t)として観測されたとする. すなわち

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) \tag{3}$$

ここで,

$$\mathbf{x}(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1^T(t) & \cdots & \mathbf{x}_n^T(t) \end{pmatrix}^T \in R^{1 \times n}$$

$$\mathbf{s}(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{s}_1^T(t) & \cdots & \mathbf{s}_n^T(t) \end{pmatrix}^T \in R^{1 \times n}$$
(4)

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \in R^{n \times n}$$
 (5)

である. 入力源の復元のために, 以下のように復元行列 W を想定する.

$$\hat{\mathbf{s}}(t) = \mathbf{W}\mathbf{x}(t) \tag{6}$$

ここで,出力信号 $\mathbf{x}(t)$ の情報のみを用いて,信号源 $\mathbf{s}(t)$ の推定信号 $\hat{\mathbf{s}}(t)$ が独立となるよう \mathbf{W} を調整することを考える.本研究では,統計的独立性を計る指標として以下で定義される Kullback-Libler Divergence を用いる.

$$I(\hat{\mathbf{s}}) = \int p(\hat{\mathbf{s}}) \log \frac{p(\hat{\mathbf{s}})}{\prod_{i=1}^{n} p_{i}(\hat{\mathbf{s}})} d\hat{\mathbf{s}}$$
(7)

ただし、 $p(\hat{s})$ は確率変数の結合確率密度関数、 $p(\hat{s})$ は確率変数の周辺確率密度関数である。この情報量は常に正となり、変数が独立の場合ゼロとなる。よって最適解を得るためには、この目的関数 I を最小化するよう W を更新することになる。いま、自然勾配法と呼ばれる更新則 14 に従うことで、W に対する以下の増分が得られる。

$$\Delta \mathbf{W} = \left(I - E \left[\phi(\hat{\mathbf{s}}) \hat{\mathbf{s}}^T \right] \mathbf{W}$$
 (8)

ここで、 $E[\cdot]$ は期待値を表し、 $\phi(x)$ はスコア関数と呼ばれる関数である。このスコア関数 $\phi(x)$ は、推定信号の確率密度関数に依存するが、通常は x^3 やtanhxなどの適当な非線形関数で近似する。ただし、推定信号の性質が優ガウス的であれば、分布形状が急峻かつ末広がりなtanhxなどの関数を適用する。また劣ガウス的であれば、広がりが小さく中心では平坦な形状となる x^3 などの関数を適用する。これにより、学習率を α として、以下の更新則が得られる。

$$\mathbf{W} \leftarrow \mathbf{W} + \alpha \Delta \mathbf{W} \tag{9}$$

よって,復元行列 $\mathbf W$ に適当な初期値を与え,式(9)で順次 $\mathbf W$ を更新していけば, $\mathbf I$ を最小化する $\mathbf W$ が得られることになる.

(2) 状態方程式の構築

車両振動システムは時間領域の式(1)で表現され、現在の入力 $\mathbf{u}(t)$ と、過去の出力 $\mathbf{x}(t)$ 、 $\mathbf{y}(t)$ 、 $\mathbf{u}(t)$ により決定される。よってこの式を、新田らの提案式 ¹⁷に従い、以下のように拡大状態空間モデルに拡張する。

$$\begin{cases}
\widetilde{\mathbf{x}}(t) \\
\widetilde{\mathbf{y}}(t) \\
\widetilde{\mathbf{u}}(t) \\
\mathbf{x}(t)
\end{cases} = \begin{pmatrix}
\mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\
\mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\
\mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} \\
\widetilde{\mathbf{A}} & \widetilde{\mathbf{B}} & \widetilde{\mathbf{C}} & \mathbf{N}
\end{pmatrix} \begin{pmatrix}
\widetilde{\mathbf{x}}(t) \\
\widetilde{\mathbf{y}}(t) \\
\widetilde{\mathbf{u}}(t) \\
\mathbf{u}(t)
\end{pmatrix} \tag{10}$$

ここで,

$$\widetilde{\mathbf{y}}(t) = (\mathbf{y}^{T}(t-p) \quad \mathbf{y}^{T}(t-p+1) \quad \cdots \quad \mathbf{y}^{T}(t-1))^{T} \\
\widetilde{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{x}^{T}(t-q) \quad \mathbf{x}^{T}(t-q+1) \quad \cdots \quad \mathbf{x}^{T}(t-1))^{T} \\
\widetilde{\mathbf{u}}(t) = (\mathbf{u}^{T}(t-r) \quad \mathbf{u}^{T}(t-r+1) \quad \cdots \quad \mathbf{u}^{T}(t-1))^{T}$$
(11)

$$\widetilde{\mathbf{A}} = (\mathbf{A}(p) \quad \mathbf{A}(p-1) \quad \cdots \quad \mathbf{A}(1))
\widetilde{\mathbf{B}} = (\mathbf{B}(q) \quad \mathbf{B}(q-1) \quad \cdots \quad \mathbf{B}(1))
\widetilde{\mathbf{C}} = (\mathbf{C}(r) \quad \mathbf{C}(r-1) \quad \cdots \quad \mathbf{C}(1))$$
(12)

である. また式(10)は,

$$\eta(t) = \begin{pmatrix} \widetilde{\mathbf{x}}^{T}(t) & \widetilde{\mathbf{y}}^{T}(t) & \widetilde{\mathbf{u}}^{T}(t) & \mathbf{x}^{T}(t) \end{pmatrix}^{T}
\mathbf{s}(t) = \begin{pmatrix} \widetilde{\mathbf{x}}^{T}(t) & \widetilde{\mathbf{y}}^{T}(t) & \widetilde{\mathbf{u}}^{T}(t) & \mathbf{u}^{T}(t) \end{pmatrix}^{T}$$
(13)

とおくことで,

$$\mathbf{\eta}(t) = \mathbf{H}\mathbf{s}(t) \tag{14}$$

と表すことができる. これにより、未知変数を含むベクトルs(t)の推定値は、復元行列 $\overline{\mathbf{w}}$ により以下のように求まる.

$$\hat{\mathbf{s}}(t) = \overline{\mathbf{W}} \mathbf{\eta}(t) \tag{15}$$

また、橋梁からの入力成分 $\mathbf{u}(t)$ の推定値は、 $\hat{\mathbf{s}}(t)$ ベクトルの最後の4成分となる.

(4) 固定要素を含む復元行列の推定

一般的な入出力関係として式(3)が与えられた場合,更新則として式(8)が適用できる.しかし状態空間モデルにより,推定する変数に固定要素が含まれる場合,この式を直接適用することはできない.すなわち固定要素を有する信号に独立成分分析を適用する場合,復元行列によって固定要素の確率密度関数が変化しないことが要請される.また固定要素については、式(7)で与えられる情報量が一定となる.この条件を満たす更新則は,新田ら¹⁷により以下のように示されている.

$$\Delta \overline{\mathbf{W}} = \mathbf{\Pi} \left(I - E \left[\phi(\hat{\mathbf{s}}) \hat{\mathbf{s}}^T \right] \right) \overline{\mathbf{W}}$$
 (16)

ただし,

$$\mathbf{\Pi} = diag \begin{pmatrix} \mathbf{0}_p & \mathbf{0}_q & \mathbf{0}_r & \mathbf{I} \end{pmatrix} \tag{17}$$

$$\mathbf{I} \in R^{n \times n}, \mathbf{0}_p \in R^{p \times p}, \mathbf{0}_q \in R^{q \times q}, \mathbf{0}_r \in R^{r \times r}$$
 (18)

である。すなわち、初期値 W_0 に対し変動要素のみを更新するよう制約を設けて最適化を行うことになる。また、最適解はスコア関数の設定に依存しやすいことが知られている。そこで本研究では、式(16)の代わりとして、推定信号のガウス性を判断して分布を調整するアルゴリズム 19 を適用し、以下のように改良する。

$$\Delta \overline{\mathbf{W}} = \mathbf{\Pi} \Big(I - sign(\kappa) E \Big[\phi(\hat{\mathbf{s}}) \hat{\mathbf{s}}^T \Big] - E \Big[\hat{\mathbf{s}} \hat{\mathbf{s}}^T \Big] \overline{\mathbf{W}}$$
(19)

ただし、 $\phi(x)$ = tanhx であり、sign(x)はx の符号に応じて性ならば 1、負ならば-1 を出力するシグナム関数である。また更新は、以下のノルム ξ がある一定値以下(本研究では 0.001)になるまで行う。この閾値は、収束の性状と推定精度を勘案して決定した。

$$\xi = \|I - sign(\kappa) E[\phi(\hat{\mathbf{s}})\hat{\mathbf{s}}^T] - E[\hat{\mathbf{s}}\hat{\mathbf{s}}^T]$$
 (20)

3. 車両走行実験

3.1 実験概要

橋梁での走行実験では、各車輪上の加速度を計測できる 計測車両を走行させ、車両応答を計測した。さらに、橋梁 と車両の連成振動を増幅させるために、加振機を搭載し加 振状態で走行できる大型車両(以下、加振車両)を連行走 行させた。

3.2 対象橋梁

対象橋梁は、4主桁非合成鋼単純鈑桁形式の橋梁である. 詳細を図-2に示す。車両走行により発生する振動計測のため、内桁G2、外桁G1および外桁G4における中間点および1/4点に、鉛直方向の加速度計を設置している。また橋梁上に起振機を設置し、強制加振を行った結果、試験橋梁の固有振動数は1次モード3.17Hz、2次モード4.76Hz、3次モード11.8Hzであった。また数値解析モデルによる検討結果から、同様に1次モード3.18Hz、2次モード4.87Hz、3次モード10.84Hz、4次モード11.82Hz、5次モード14.34Hz、6次モード18.11Hzという数値が得られている⁹. 図-3に固有振動モード形状を示す。

3.3 計測車両および加振車両

本研究では、計測車両としてトヨタ社製普通乗用車を用いた。普通乗用車の概要を図4(1)に示す。計測車両の後輪サスペンションは、剛なフレームで連結されているが、前輪サスペンションは左右独立した形式となっている。なお計測車両の四輪には、バネ上とバネ下にひずみゲージ式加速度計を設置した。この計測車両に対し木片からの乗り上げ落下試験を行った結果、バネ下では図-5のようなスペクトルが得られた。図より、バネ下では2Hz付近にピークが存在するが、5Hz付近にはピークが現れていないことがわかる。また同様にバネ上では、2Hz付近および11Hz付近に大きなピークを有するパワースペクトルが得られた。

また本研究では、加振車両として、車両上に起振機が設置されている大型車両を用いた. 加振車両は、走行と同時

に正弦波加振が可能な車両である。加振車両の概要を図-4(2)に示す。起振機はトラックの後輪二軸の中間位置に配置されており、最大加振力19.2kN、最大振幅20mmで、0.05~200Hzの加振状態を作り出すことができる。

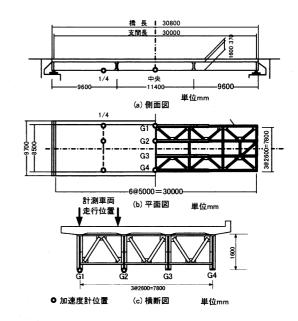


図-2 対象橋梁 (試験橋梁)

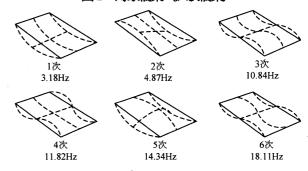


図-3 対象橋梁の振動モード

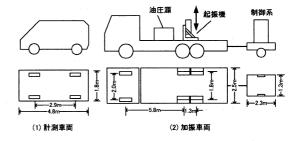


図4 計測車両および加振車両

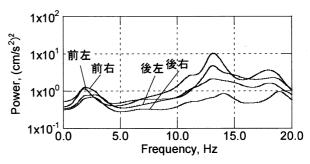


図-5 木片乗り上げ落下によるバネ下応答

3.4 走行ケース

本研究で検討を行った走行ケースを表-1 に示す. Case20-0, Case40-0 では、時速 20km および 40km におい て、起振機を起動せず大型車両の連行走行のみで計測を行 う. また Case20-1, Case20-2 では, 橋梁の 1 次モードおよ び2次モードの固有振動に近い3.17Hz, 4.63Hz での加振 状態で連行走行を行う. 解析に用いたデータは、計測車両 が橋梁の中央支間付近を通過した時間帯で、伸縮装置によ る衝撃が減衰し、振幅がほぼ一定となっている箇所を利用 した. 記録時間はケースによって異なるが、およそ 1~3 秒である. またサンプリング周波数は 1000Hz とし、300Hz のローパスフィルタを掛けて記録を行った. ただし、モデ ル次数とサンプリング数の調整のために、解析の段階で 250Hz までダウンサンプリングした. またダウンサンプリ ングでは、修正後のナイキスト振動数である 125Hz のロー パスフィルタを修正前のデータに掛けた後、1/4 間隔で間 引きして行った.

また対象橋梁での加速度応答の計測は、計測車両が中央を通過したと同時刻でのデータを用いている。この加速度応答から得られたパワースペクトルなどにより、卓越した振動数とモードはそれぞれ表・1に示す通りとなった。それぞれの振動数で加振した場合、加振振動数に近いモードの振動が励起されている。

衣-1 検討グーク			
Case	時速	加振振動数	橋梁卓越振動数
20-0	20km/h	0	4.38Hz (2 次)
40-0	40km/h	0	3.40Hz(1 次)
20-1	20km/h	3.17Hz	3.32Hz(1 次)
20-2	20km/h	4.63Hz	4.62 Hz (2 次)

表-1 検討ケース

4.1 走行試験結果

走行試験により得られた車両応答波形の一例を図-6図 -7 に示す. これは時速 20km において走行した場合のバネ 上およびバネ下の時刻歴波形である。また、これらの波形 を周波数解析した結果を図8に示す. 本研究では、応答の 記録時間が短い場合でも高い分解能を有する Burg 法によ りパワースペクトルを求めた. Burg 法は, 自己相関関数 のフーリエ変換を基本とする解析法で、情報エントロピー が最大となるようスペクトルを決定する方法である. 通常 のFFTと比べ短い記録時間でも高い分解能が得られるが、 適切な次数を設定する必要がある²⁰⁾. 本研究では、Burg 法の次数をデータ数の平方根に 2 を掛けた値を目安とし て決定した. 図より、これらのパワースペクトルには、橋 梁の卓越振動数に対応する 4.38Hz 付近のピークは確認で きない. Case40-0 の場合も同様である. 一方 Case20-1, Case20-2 の場合, 加振車両の効果により連成振動が増幅さ れ、橋梁の卓越振動数に対応するピークが一部確認できる 場合もある。しかし、いずれの場合でも、車両応答のスペ クトルにおいて, 橋梁の卓越振動数に対応するピークは明 確でなく、車両応答のみで橋梁の卓越振動数を判断するこ とはできない.

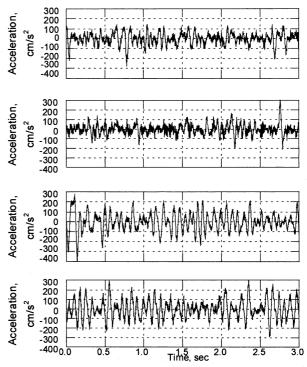


図-6 バネ下の応答(上から前左,前右,後左,後右の順)

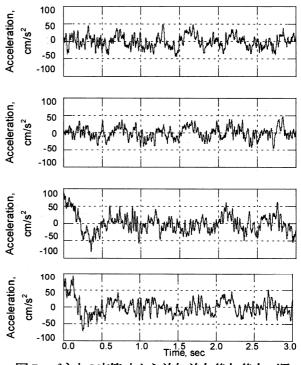
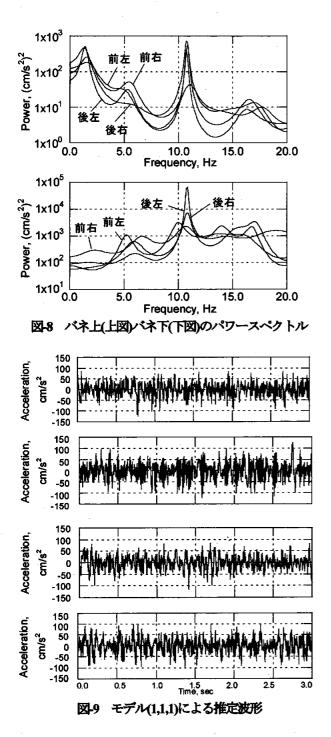


図-7 バネ上の応答(上から前左,前右,後左,後右の順)

4.2 同定結果

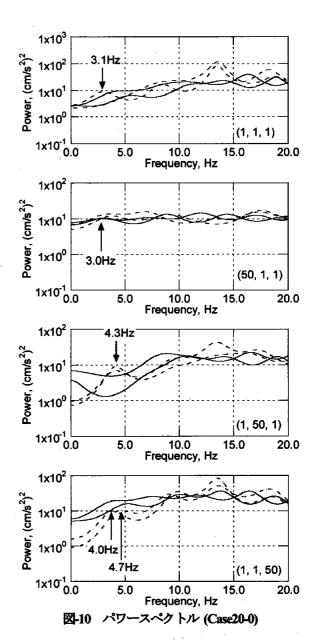
(1) 次数の影響

図-9 に、Case20-0 における波形の同定結果の一例を示す. この波形は、式(1)における次数を(p,q,r)で表した場合、(1,1,1)となる場合の推定信号である. この推定信号を時間領域で表した場合、4 つの成分に明確な差異が見受けられない. また他のケースでも、同様の傾向が得られている. これはいずれのケースまたはモデルにおいても同様であっ



た. これらの波形は、高周波が卓越した波形となっており、 橋梁の固有振動由来の成分を特定することはできない、し かしこれらの成分を路面プロファイルの入力と考えた場 合、システムの入力としては妥当な推定結果であると考え られる. すなわち、周波数の高い信号がシステムに入力さ れ、自己回帰を含んで遅延回路により低周波の信号が出力 された状態を表している. しかし、橋梁の振動成分とプロ ファイル成分の独立性が明確でないと考えられ、橋梁の振 動成分をそのまま抽出することができていないと思われ る. よって以下では、これらの信号に含まれる低次卓越振 動数に着目し、評価を行うこととする.

次に、次数p, q およびrの感度を検討した。ここでは、 これらの数値を変化させ、推定信号より得られるパワース



ペクトルを比較した。その結果を図-10 に示す。また各図中右下に、モデル次数を合わせて示している。これより、モデル(1,1,1)では、3.1Hz付近において一部の波形でピークが確認できる。次に、モデル(50,1,1)では、3.0Hz付近に何らかの起伏が見られるものの、明確ではない。しかしモデル(1,50,1) においては、4.3Hzにピークがあり、明確な違いが現れている。すなわち、次数pを変化させてもほとんど推定結果に変化がないことがわかる。ただしこれらの例では、次数rを1に固定しているが、他の数字に設定した場合でもほぼ同様の結果が得られた。また次数rを大きくした(1,1,50)の場合でも、4Hz付近にピークが現れている。よって、入力信号推定には次数qおよびrが影響することがわかった。

次に、次数rを変化させた場合を検討した。次数rは同定結果に大きく影響しており、特に次数を大きくしすぎると、推定信号の振幅が定まらなくなる傾向が見受けられた。本研究で用いたアルゴリズムは、混合行列の成分行列 C の対角成分を1とし、それ以外の成分を1より小さく正規

化することで、復元された信号の順序や振幅の不定性を解決している. しかし次数が大きすぎると、対角成分以外の成分が大きくなり、行列 C を正規化できなくなるため、正しく推定できなくなった.

最後に、いくつかの次数を組み合わせ、推定結果を比較したところ、(1,70,10)において 4.6Hz にピークをもつ信号が得られることがわかった。このときの波形とスペクトルを図-11、図-12 に示す。この次数の場合、おおよそ良好な推定が行われていると考えられるため、他のケースについても(1,70,10)におけるモデルを検証する。ただし、次数の組み合わせによって最適解も異なるため、現象に応じた数を試行錯誤的に決定する必要があると思われる。

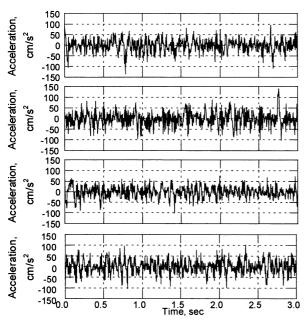
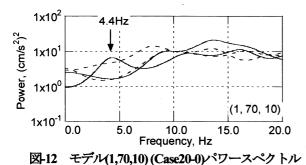


図-11 モデル(1,70,10) (Case20-0)による推定波形



(2) 加振状態の影響

良好に推定が行えていると判断されたモデル(1,70,10)を用いて、Case20 シリーズを比較する. 図-13 および図-14 には、この次数モデルで得られた推定信号のパワースペクトルを示す. 加振振動数 3.17Hz で連行した場合、推定信号に3.4Hzが現れている. しかし、4.63Hzで加振した場合、4Hz付近には明確なピークは現れていない. これは、加振車両の加振力が振動数に依存し、4.63Hz の場合十分な連成が発生しなかった可能性がある. また適切な次数を設定すれば、4Hz付近にピークが発生する可能性もあるため、適

切な次数の設定は今後の検討課題である.

(3) 走行速度の影響

次に、モデル(1,70,10)を用いて Case20-0 と Case40-0 を比較した. 表-1 より、速度が時速 20km から 40km になると、橋梁の卓越振動数およびモードが変化している。これは、速度増加に伴う加振力の増加が原因と思われる。一方、図-15 に Case40-0 での推定信号のパワースペクトルを示す。計測車両では、走行速度が速くなったため、橋梁と共振する時間も減少し、推定結果に現れなかった可能性がある。すなわち本件の推定問題に独立成分分析を適用する場合でも、想定する系が十分連成し、共振状態になる必要があるといえる。

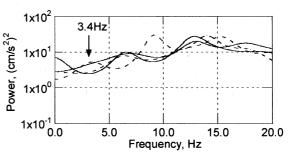


図-13 モデル(1,70,10)(3.17Hz 加振)パワースペクトル

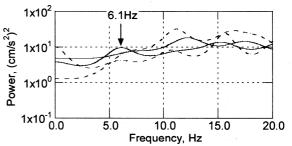


図-14 モデル(1,70,10)(4.62Hz 加振)パワースペクトル

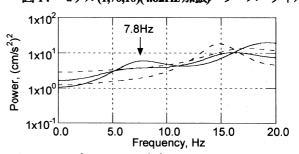


図-15 モデル(1,70,10)(時速 40km)パワースペクトル

5. まとめ

本研究では、橋梁上を通過する車両の振動応答から橋梁の振動成分を抽出する手法として、車両のシステム状態モデルによる独立成分分析の適用を行い、実橋梁での車両走行実験の結果に基づきその適用性を検討した。その結果、以下の知見が得られた。

1. 橋梁振動と路面プロファイルの独立性は低く,両者を 完全に分離すことができなかった.しかし混合された 信号のスペクトルに着目することで,橋梁の振動成分

- を抽出できる可能性がある.
- 2. 車両振動に含まれる橋梁の振動成分を抽出するためには、橋梁と車両が十分連成状態にあることが必要と考えられる.
- 3. 目標とする振動数を抽出するには、適切なAR次数の設定が必要である.
- 4. 次数の設定によっては、繰り返し計算が収束せず、解 が得られない場合があった

本研究では、独立成分分析の適用に焦点を当てて検討を 行ったが、適切な次数の設定など課題も多く、今後さらな る検討が必要である。また動的問題への拡張が可能である ため、今後様々な推定問題に独立成分分析を適用し検討を 行っていく予定である。

謝辞

本研究の一部は、新道路技術会議の助成制度「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」の補助により行われました。ここに謝意を表します。また研究遂行にあたり、ご協力頂いた国土交通省国土技術政策総合研究所の玉越隆史氏、石尾真理氏、東京測器研究所(株)の岡野晴樹氏、高崎廣明氏、鈴木光正氏、(財)海洋架橋・橋梁調査会の陵城成樹氏、京都大学大学院の中淵大輔氏、大阪市立大学大学院の北垣啓氏、JIP テクノサイエンス(株)の狩野正人氏に対し、合わせて謝意を表します。

参考文献

- 西村昭,藤井学,宮本文穂,加賀山泰一:橋梁の損傷評価に おける力学的挙動の有効性,土木学会論文集,No.380/1-7, 355-364,1987.
- 2) 貝戸清之,阿部雅人,藤野陽三:不確定性を考慮した非比例 減衰系の同定と構造物の性能評価への適用,構造工学論文集, Vol.45A,土木学会,701-712,1999.
- Hassiotis S, Jeong GD.: Identification of stiffness reduction using natural frequencies, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.121, No.10, ASCE, 1106-1113, 1995.
- Y.-B.Yang, C.W. Lin, J.D. Yau: Extracting bridge frequency from the dynamic response of a passing vehicle, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.272, 471-493, 2004.
- 5) C.W.Ling, Y.B.Yang: Use of a passing vehicle to scan the

- fundamental bridge frequencies: An experimental verification, *Engineering Structures*, Vol.27, 1865-1878, 2005.
- 6) 阿部雅人,藤野陽三,長山智則,池田憲二:常時微動計測に 基づく非比例減衰系の構造同定と長大吊橋への適用例,土木 学会論文集, No.689/1-57, 261-274, 2001.
- 川谷充郎,山田靖則,嶽下裕一:三次元車両モデルによる桁橋の動的応答解析,土木学会論文集,No.584/I-42, pp.79-86, 1998.1.
- 8) 川谷充郎, 西山誠治:路面凹凸を考慮した道路橋の走行車両による動的応答特性, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.733-740, 1993.3.
- 9) 北垣啓,山口隆司,北田俊行,杉浦邦征,狩野正人:走行車 輌の応答による橋梁の損傷同定に関する解析的研究,鋼構造 年次論文報告集,Vol.15,社団法人日本鋼構造協会, pp.585-590,2007.
- 10) 根元幾,川勝真喜:詳解独立成分分析,東京電機大学出版局, 2006
- 松岡清利:独立成分分析の基礎,システム/制御/情報, Vol.48, No.10, pp.395-400, 2004.
- 12) 甘利俊一:情報幾何とその応用-IX独立成分分析, システム/制御情報, Vol.49, No.9, pp.381-386, 2005
- 13) 中迫昇, 小倉久直: 独立成分分析の基礎と音響信号処理, システム/制御/情報, Vol.46, No.7, pp.400-408, 2002.
- 14) 村田昇:独立成分分析,東京電機大学出版局,2005.
- 15) 古川愛子, 清野純史, 大塚久哲: 独立成分分析を用いた起振 応答の抽出法と損傷同定問題への適用, 応用力学論文集, Vol. 9, pp.43-54, 2006.8
- 16) 新田益大, 杉本謙二:独立成分分析を用いた自己回帰モデルの未知入力同定法,計測自動制御学会論文集, Vol.41, No.5, pp.444-451, 2005
- 17) 新田益大,杉本謙二:独立成分分析に基づく多入力多出力システムのブラインド同定,電子情報通信学会論文誌A, Vol.J90-A, No.1, 27/34, 2007.
- 18) 新田益大,鈴木新,杉本謙二,安達直世:独立成分分析を用いた機械振動系のブラインド同定実験と構造変化検出,システム制御情報学会論文誌、Vol.19, No.5, 177/184, 2006.
- Girolami, M. and C. Fyfe: Negentropy and kurtosis as projection pursuit indices provide generalized ICA algorithms, Nips'96 Workshop, Blind Signal Processing, 1996.
- 20) 日野幹雄:スペクトル解析,朝倉書店,1977.

(2008年4月14日受付)