

橋梁の振動特性同定に関するモニタリングシステムについて

Study of Monitoring System for Identification of Vibration Characteristics on Bridge Structures

北海道大学大学院工学研究科 正 員 小幡卓司 (Takashi Obata)
北海道大学大学院工学研究科○学生員 三田知幸 (Tomoyuki Sanda)
北海道大学大学院工学研究科 F 会員 林川俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
北海道大学大学院工学研究科 F 会員 佐藤浩一 (Koichi Sato)
北海道大学大学院工学研究科 学生員 宮森保紀 (Yasunori Miyamori)

1. まえがき

我が国では、旧態然とした都市構造の大部分が第二次世界大戦末期の空襲により焦土と化したことから、戦後全国各地において都市整備計画が行われ、その後の高度経済成長によって数多くの橋梁をはじめとする各種の構造物が建設されてきた。今日、社会資本の充実に伴って供用後30年程度以上経過した土木構造物が次第に増加する傾向にあり、これらに対して費用・労力を抑制しながらも長寿命化を図ることが、近年の大きな課題になっている¹⁾。よって、今後は維持管理の強化・充実が重要であるが、現在一般的に行われている目視点検によってすべての構造物に対応することは非常に困難であり、何らかの簡便かつ容易な点検手法を確立することが必要であると考えられる。

一方、振動測定結果から構造物の健全度評価あるいは何らかの損傷を同定しようとする発想は、損傷に伴って剛性が低下し、固有振動数が小さくなる、あるいは減衰定数が変化する等の可能性が力学的な観点から十分に推定し得るため、比較的古くから提案されている^{2~11)}。橋梁関係の研究においては、西村らによって、格子桁の外桁全体に30%の剛性変化が生じた場合には各次の固有振動数が10~15%程度減少し、減衰定数の変化は、桁剛性が10~20%以上低下しないと現れないことが報告されている²⁾。また、加藤らは、PC橋梁において破壊に至るまで載荷を行い、振動測定を実施して損傷が振動特性に及ぼす影響について検討を加えた^{3,4)}。さらに、建築工学あるいは機械工学の分野でもこの種の研究は盛んに行われており、比較的損傷が大きい場合には常時微動等の測定によって得られたモード形状あるいは固有振動数と、固有振動解析結果との比較により、損傷度および損傷位置の同定が可能となりつつある^{5~7)}。

しかしながら、鋼橋の初期的な損傷を例に考えれば、その主な発生箇所はほとんどがガセットプレート、垂直補剛材等のいわゆる2次部材の溶接部に発生する場合が多いことが知られている。よって、仮にこのような部材にかなり大きな損傷が生じた場合でも、構造物全体としての剛性低下は微小であるため、一般に卓越しやすい低次の固有振動数にはほとんど影響を及ぼさず、測定が比較的困難な高振動数帯に変化が生じる可能性が大きいことが容易に理解できる。したがって、高次の振動応答が十分に把握できれば、ヘルスマニタリングへの応用が容易に実現できる可能性を有するものと考えられる。近年においては、デジタル技術あるいは計測器等の非常に目覚ましい進歩によって、振動をはじめとした各種データのモニタリングが高精度かつ安価に行えるようになりつつあり、測定データに含まれる損傷による影響等の必要とされる情報を簡便に抽出できるような手法も、ある程度確立されるようになってきた。例えば、実構造物において測定された振動等のモニタリングデータにはノイズが含まれており、この影響がしばしば問題になることが知られている。長期モニタリングにおける常時微動の測定結果や、比較的高い振動数範囲の応答を解析対象とする場合、ノイズと構造物の応答レベルがほぼ同程度であるようなケースもあり得るが、その対応も

現在ではある程度可能になりつつある¹²⁾。よって、これらの常時微動あるいは高次振動を対象とした振動特性の同定が、高度な専門知識等を必要とすることなく実現可能となれば、多数の老朽化した橋梁構造物のヘルスマニタリングにも用いることができると思われる。

以上を踏まえて、本研究は橋梁の振動計測データから、スペクトルの計算、フィルタリング等の処理を一貫して行い、損傷等に伴う振動特性の変化を容易に把握できるモニタリングシステムの構築を試みることを目的とする。具体的には、まずこれら一連の解析を簡便かつ迅速に行うために、MATLABを用いてGUIの構築を行った。主な解析手法は、上述のようにフィルタリング、FFT、コヒーレンス等の計算に加え、著者らの一部が従来より研究を行っている、波形データの分散値を求め、これをスペクトル状に表現する方法を用いることとした¹³⁾。すなわち、振動モニタリングデータに対して、所定のパスバンドを有するIIR型バンドパスフィルタを0.01~0.05Hz程度のピッチで、およそ1.2Hzから必要な振動数の範囲まで移動させながら連続的にフィルタリングを行い、フィルタの振動数に応じた応答を抽出する。この各々のデータについてノイズ成分による影響を極力排除するために、自己相関関数を算出した上で、これらの無次元化されたデータの分散値を求め、パスバンドの中心振動数をパラメータとしてスペクトル状に表現し、構造物の動的応答特性を把握しようとする方法である。次に、橋梁構造物の主桁と横桁および横構を模した実験供試体を用いて振動測定実験を行い、振動特性の同定を試みた。以上の結果から、本研究におけるモニタリングシステムの適用性、妥当性に関して考察を加えたので、ここに報告するものである。

2. GUIの構築

本研究では、振動モニタリングデータに対して簡便かつ迅速に各種の解析を可能とするために、MATLABを用いてGUI(Graphical User Interface)の構築を行った¹⁴⁾。GUIはメニュー・ボタン・リストのようなグラフィカルオブジェクトを使って作成したユーザインタフェースであり、GUIの要素としてはコントロール部とメニュー部の2つのクラスに分けられる。コントロール部は、マウスを用いて何らかの操作を行った際に、実際に実行される事項を記述するためのグラフィカルオブジェクトであり、GUIを使用する場合は、主な操作をこの部分で行う。メニュー部は一般にプルダウンメニュー等を意味しており、マウス操作では十分扱えないサンプリング周波数、保存ファイル名等の記述を行うものである。

本研究で作成したGUIプログラムの機能は、測定された波形の出力、フィルタリング、高速フーリエ変換、コヒーレンスおよび振動波形の分散値を求めてこれをスペクトル状に表現する手法が実装されており、これらを機能別に34個のプログラムに分割して記述することで成り立っている。このため、新たな機能を追加することも、ある程度簡便に行うことができる。なお、上述の分散値をスペクトル状に表現する手法に関しては、次章において詳しく述

べることとする。また、複数のモニタリングデータの比較を行うために、最大7ケースのデータを同時に取り扱うことが可能となっており、例えば健全時および損傷時のデータを同時に表示して、振動特性の変化を視覚的に判断することも比較的容易に行えるものである。図-1 に本研究における GUI の解析画面を示す。

以上のようなモニタリングシステムを用いて、本研究ではある程度微小な剛性変化を与えた実験供試体の実測データから、振動特性の変化を捉えることを試みるものである。

3. 波形の分散値に基づいた振動特性の把握

3. 1 解析手法

前述の通り、本研究では波形データの分散値を求め、これをスペクトル状に表現する方法を用いて構造物の振動特性を把握するための検討を実施した。具体的な解析方法は、振動モニタリングデータに対して、バンドパスフィルタを移動させながら連続的にフィルタリングを行い、この各々のデータについて自己相関関数を算出した上で、分散値を求めてスペクトル状に表現し、構造物の卓越振動数ならびに減衰定数を求めようとする方法である。

まず、フィルタリングに関しては、任意のフィルタタイプの中で求められた設計仕様を最小の次数で与えることが可能な IIR 型楕円バンドパスフィルタを採用した¹⁵⁾。本フィルタは、一般に鋭いローloff特性を示し、通過帯域と遮断帯域の両方で等リップルを持つことから、優れた特性を有していることが知られている。本研究では、フィルタの設計諸元として、通過周波数帯域は 1Hz、遮断周波数帯域はその前後 1Hz、通過帯域全体におけるリップルを 3dB、遮断帯域で減少させるゲインを 40dB とし、これを 0.05Hz ピッチで 1.5Hz～100Hz 程度まで連続的に移動させることにより所定にデータを得た。

自己相関関数の算出は、一般に $x_m(m=0,1,2,\cdots,N-1)$ で表される信号データにおいて、

$$R_j = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m x_{m+j} \cdots \cdots \cdots (1)$$

によって自己共分散係数 $R_m(m=0,1,2,\cdots,N-1)$ が求められる。ここで、2つの標本点 m と $m+j$ 間の時間間隔を時間遅れと表現する。今、 $j=0$ の場合、すなわち x_m と x_m の相関を考えると、以下の式を得ることができる。

$$R_0 = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m^2 \cdots \cdots \cdots (2)$$

式(2)は標本値の2乗平均であり、一般的には平均パワーを表している。ここで、式(1)と式(2)の比を取ることによって自己共分散係数を無次元化すると、

$$\rho_j = \frac{\sum_{m=0}^{N-1} x_m x_{m+j}}{\sum_{m=0}^{N-1} x_m^2} \cdots \cdots \cdots (3)$$

となり、これが自己相関係数、あるいは自己相関関数と呼ばれるものである¹⁶⁾。自己相関関数は、パワースペクトルの逆変換として知られており、元の信号に含まれる卓越する振動数の情報をより増幅する形で得ることができ、その結果は無次元量となるため、異なる測点間の時系列データを比較することも、比較的容易になるものと思われる。したがって、実験によって測定された振動データに対して自己相関関数を用いて無次元化することにより、測点間ならびに個々の測定データ間における振幅の差による影響をある程度排除することが可能になると考えられる。

次に、本研究では自己相関関数に含まれる、振動特性の微小な変化を増幅し、かつ数値化して定量的に扱う手法として、それらの分散値を用いることとした。自己相関関数そのものは、一種の時系列データであるために、例えば軽

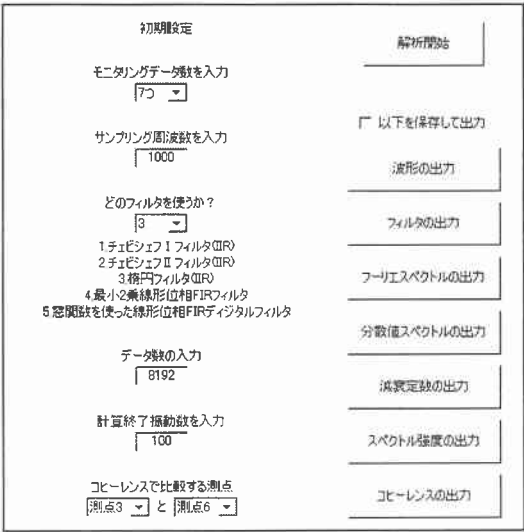


図-1 GUI の解析画面

微な損傷等による微小な変化を自己相関関数のみで定量的に判断することは非常に困難であり、何らかのスカラー量に置き換えるのが望ましいと考えられる。振動特性の変化によって生じる自己相関性への影響を、分散値を求めてスカラー量としての有意な増減を捉えることによって、その評価が十分に可能になるものと推定される。

一般に、時系列データに対する分散値は、以下の式与えられる¹⁷⁾。

$$\sigma_{var}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x(i) - \bar{x})^2 \cdots \cdots \cdots (4)$$

ここで、式(4)における $x(i)$ は自己相関関数の各時間遅れにおけるデータであり、 $\bar{x}$ は自己相関関数の平均値、 i は時間遅れの離散ステップ数である。式(4)からわかるように、分散値の計算結果はある一つの時系列データに対して一つの値を出力するが、これを所定のパスバンドでフィルタリングされたデータ毎に計算することにより、パスバンドの中心振動数をパラメータとして、個々の分散値と1対1対応で表現することが可能となる。したがって分散値を振動数軸に対してプロットすることで、各振動数において分散値がどのように変化するかを、スペクトル様に表すことが可能となり、これを本研究においては分散値スペクトルと称することとする。

3. 2 分散値スペクトルの特性

以上のような手法によって振動特性の把握を行うためには分散値スペクトルそのものの性質・特性を十分に把握する必要がある。そこで、比較的大きいノイズ成分が含まれた振動波形から、卓越成分の抽出が可能であるか、また、減衰定数の変化に応じて分散値スペクトルのピーク値がどのように変化するかについて検討を加えることとした。

まず、卓越振動数成分の把握に関しては、最大振幅 1.0、20Hz および 40Hz の2つの正弦波を重ね合わせ、これにランダムノイズを加えた波形を対象に行うこととした。結果の一例として、図-2 に実効値が 1.0 のノイズを加えた場合の分散値スペクトルを示す。図-2 に着目すると、波形にはかなり大きなノイズ成分が含まれているにもかかわらず、分散値スペクトルにおいては 20Hz と 40Hz での極めて明瞭なピークが確認できる。また、ノイズと有意信号の最大値の比を変化させた場合においては、ノイズの最大値に対して有意信号が 40%程度含まれていれば、十分に卓越成分が把握できることが確認された。これは、センサーの S/N 比をわずかでも上回る信号が測定されれば、その成分を分離・認識することができると推定され、従来の手法に比し

てノイズの影響を排除しやすいものと思われる。

次に、減衰の影響については、減衰定数を変化させた 1 自由度系の減衰自由振動解析データを作成し、個々の減衰と分散値スペクトルのピーク値がどのような変化を示すかについて検討を行った。ここでも、卓越振動数の確認の場合と同様に、より現実に近い加速度波形を作成するために、有意な振動振幅に対してランダムノイズを加えることとした。解析モデルの固有振動数は、20Hz および 40Hz の 2 種類とし、減衰定数は 0.1%～10%まで変化させた。図-3 に、減衰定数の変化とスペクトルのピーク値の関係を示す。

図-3 における 20Hz と 40Hz の結果を比較すると、減衰定数の増大に伴うピークの変化が、40Hz の場合が 20Hz に対して 2 倍になっていることがわかる。これは、減衰自由振動の応答波形において同一の減衰定数を有する場合、振動数が 2 倍になると、応答がゼロに収束するまでの波数も同様となるため、例えば応答が収束するまでの時間に対して自己相関関数を求めて分散値を算出すれば、ある減衰定数において振動数の比に応じた形でスペクトルのピークが変化するものと考えられる。よって、図-3 のような分散値スペクトルのピーク値と減衰定数の関係を、振動数に関して無次元化して表現することにより、構造物の各モードに対する減衰定数の推定がある程度簡便に行える可能性を有するものと思われる。以上より、本研究では基準となる振動数を 1Hz とした場合の減衰定数とピークの最大値の関係を求め、得られた曲線を最小二乗法によって近似して減衰定数の推定を行うこととした。以下にその式を示す。

$$h = 2.06 \times y^{0.24} / f \cdots \cdots (4)$$

ここで、 h は減衰定数、 y は基準振動数におけるピーク値、 f は卓越振動数である。したがって、対象とするモードに対応するスペクトルのピーク値に、その固有振動数と基準振動数の比を乗じることによって式(4)における y を求め、これを代入することにより、その減衰定数を得ることができる。

4. 減衰自由振動実験

本研究で作成したモニタリングシステムの適用性を検討するために、実験供試体を用いて減衰自由振動実験を行った。対象とした実験供試体は、橋梁構造物の主桁と横桁および横構によって構成される部分を想定した構造物である。表-1 は構成部材の諸元である。

実験方法は、まず、主桁中央部に 10cm 離れた位置から水平方向に重錘を衝突させて加振し、所定の応答を得た。また、測定方法は、2G 加速度ピックアップを供試体の対称性のある程度考慮して、供試体上に 6 基配置して計測を実施した。計測システムとしては、ソフトウェアに LabVIEW を採用し、加速度計からのデータを動ひずみ計で増幅し、A/D 変換ボードを介してパソコンに直接入力することにより行っている。なお、サンプリング周波数は 1000Hz、各測点におけるデータ個数は 8192 個、すなわち約 8.2 秒間のデータを計測することとした。

本研究では、構造物の比較的小さい剛性変化に伴う振動特性の差異を把握することを目的としているため、横構端部の接合部における高力ボルトの拘束力を変化させることにより、この剛性変化を表現することとした。すなわち、全てのボルトが締結されている場合を基本状態とし、所定のボルトを弛緩することによって各種の剛性変化の状態を設定する手法を用いている。表-2 に、実験で設定したケースごとの弛緩させた高力ボルトの位置を示す。ここで、弛緩させたボルトについては、加振時にその状態が変化しない程度の若干のトルクを導入することとした。

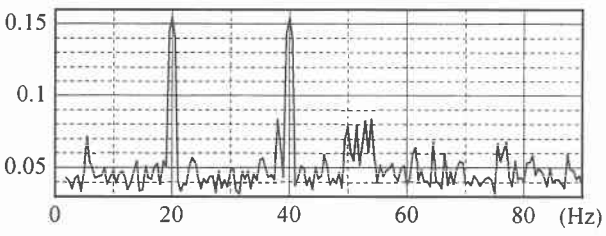


図-2 分散値スペクトル

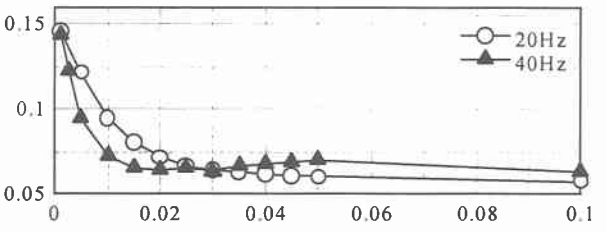


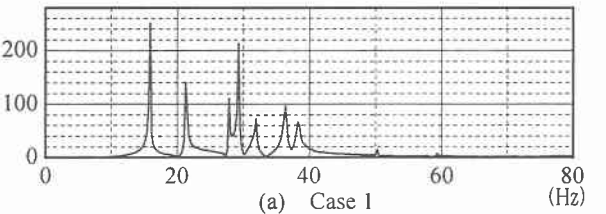
図-3 減衰定数とピーク値の関係($h \times 100\%$)

表-1 構成部材の諸元

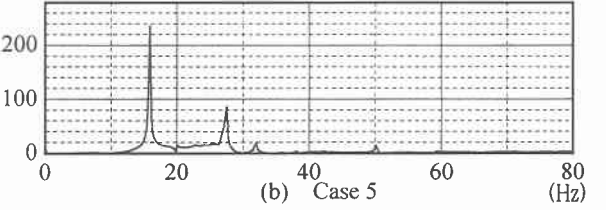
部材	長さ×高さ×幅 (mm)
主桁、端横桁	平鋼 2 500× 65× 22
	平鋼 400× 65× 22
横構 (斜材)	丸鋼 1 120× φ 9
ガセットプレート	平鋼 263× 9× 69
支承条件	全方向固定

表-2 実験ケース

Case No.	弛緩した高力ボルト
Case 1	なし
Case 2	e, f, g, h
Case 3	a, b, c, d
Case 4	b, c, e, f, g, h
Case 5	a, b, c, d, f, g



(a) Case 1



(b) Case 5

図-4 フーリエスペクトル (測点 1)

5. 解析結果ならびにその考察

解析結果の一例として、図-4 に測点 1 における Case 1 と Case 5 のフーリエスペクトルを、図-5 に同様の測点、Case における分散値スペクトルを示す。また、図-6 は図-5 の結果から得られた各ピークに対する減衰定数である。なお、参考として表-3 に供試体の固有振動解析結果を示す。

まず、図-4 および図-5 を比較すると、両者の卓越振動数はほぼ一致し、本研究の波形の分散値をスペクトル状に表現する方法は、比較的高い精度を有しているものと思われる。分散値スペクトルにおいては、前述のようにノイズと有意信号を比較的内容易に分離でき、有意な応答が生じていない場合にはある一定値となることから、フーリエスペ

表-3 固有振動解析結果

Mode No.	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th
振動数 (Hz)	17.07	24.67	30.80	32.26	32.51	32.62	43.43	51.09	51.72	54.06

クトルに比して卓越振動数がより明確に把握することが可能であると考えられる。特に、Case1 と Case5 のように、剛性の差異に伴う振動数の変化を捉えるためには、比較的有効であり、損傷同定等への応用が十分に期待できる。また、本システムではコヒーレンスを算定し、パソコンの画面上へ同時に出力することも可能であるため、対象とする構造物の健全時におけるデータがあれば、各モードがどの程度変化しているかも測定を実施しながら検討することができる。さらに、本研究の手法では図-6 に示すように分散値スペクトルのピーク値のみで減衰の推定が行えるため、上記のコヒーレンスと同様に振動特性の把握には極めて有効であると思われる。

以上の結果から、本研究のモニタリングシステムは橋梁構造物等の振動特性の検討に際して、特別な知識を要することなく、比較的簡便に必要とされるいくつかの情報を得ることができ、他の機能も容易に追加することも可能であると判断される。したがって、完成時の振動実験等に限らず、今後増加すると思われるヘルスマニタリングにも応用できる可能性を有するものと推定できる。

6. あとがき

以上のように本研究では、構造物の振動計測データから、スペクトルの計算、フィルタリング等の処理を一貫して行い、損傷等に伴う振動特性の変化を容易に把握できるモニタリングシステムの構築を試みることを目的として、MATLAB を用いて一連の解析を簡便かつ迅速に行うための GUI の構築を行ったものである。

減衰自由振動実験結果に対する本モニタリングシステムの解析結果からは、得られた実験データについて、即座に卓越振動数の把握、減衰定数の推定あるいはコヒーレンスからの卓越モードの確認等が、非常に容易に行えることが判明した。また、本研究の分散値をスペクトル状に表現する方法に関しては、比較的大きいノイズが含まれる場合においても、フーリエスペクトル等に比してより明確な形で卓越する応答を確認できる可能性を有するものと考えられる。

したがって、本研究のモニタリングシステムは、一般の振動測定結果の解析のみならず、現場等においても迅速に構造物の振動特性の把握が行えるため、振動データに基づいたヘルスマニタリングへの適用の可能性も有するものと考えられる。

【参考文献】

- 1) 西川和廣：道路橋の寿命と維持管理，土木学会論文集，No.501/I-29，pp.1-10，1994.
- 2) 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挙動の有効性，土木学会論文集，No.380/I-7，pp.355-526，1987.
- 3) 加藤雅史，高木保志，島田静雄：PC 橋梁の破壊に伴う振動性状の変化に関する実験的研究，土木学会論文集，No.341，pp.113-118，1984.
- 4) Kato, M. and Shimada, S. : Vibration of PC Bridge during Failure Process, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.112, No.7, pp.1692-1703, 1986.
- 5) 宗像康一，三好敏晴，濱本卓司：2 軸偏心を有する多層建築物の鉛直・水平 2 段階損傷検出～その 2 振動台実験による損傷検出法の検証～，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.403-404，1998.
- 6) 近藤一平，濱本卓司：振動台実験のランダム応答データを用いた多層建築物の損傷検出，日本建築学会構造系論文集，第 473 号，pp.67-74，1995.
- 7) 長峰正紀，内田浩：はり構造物におけるクラックの位置と深さの同定，北海道大学工学部研究報告，第 179 号，1997.
- 8) 山崎智之，三上修一，大島俊之，本間美樹治，斉藤隆行：老朽 RC 橋の損傷付加振動実験，土木学会北海道支部論文報告集，第 52 号(A)，pp.490-493，1996.
- 9) 小幡卓司，深井隆史，水草浩一，林川俊郎，佐藤浩一：振動ノイズの分析に基づいた橋梁構造物の損傷推定について，土木学会北海道支部論文報告集，第 54 号(A)，pp.280-283，1998.
- 10) 小幡卓司，深井隆史，水草浩一，林川俊郎，佐藤浩一：振動測定データに基づいた橋梁構造物の損傷同定に関する一考察，鋼構造年次論文報告集，第 6 巻，pp.457-462，1998.
- 11) 小幡卓司，林川俊郎，佐藤浩一，水草浩一：振動モニタリングデータに基づいた鋼橋の損傷同定に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.46A，pp.531-538，2000.
- 12) 新山惇，佐藤昌志，池田憲二，菅原登志也，佐藤浩一：白鳥大橋の固有振動数評価に関する常時微動観測法の適用性，構造工学論文集，Vol.46A，pp.469-477，2000.
- 13) 小幡卓司，三田知幸，林川俊郎，佐藤浩一：橋梁の損傷時における振動特性のモニタリング手法について，土木学会北海道支部論文報告集，第 57 号，pp.108-111，2001.
- 14) The Math Works Inc.: Building GUIs With MATLAB，サイバネットシステム株式会社，1999.
- 15) 中村尚五：ビギナーズデジタルフィルタ，東京電機大学出版局，1989.
- 16) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994.
- 17) 星谷勝：確率論手法による振動解析，鹿島出版会，1974.

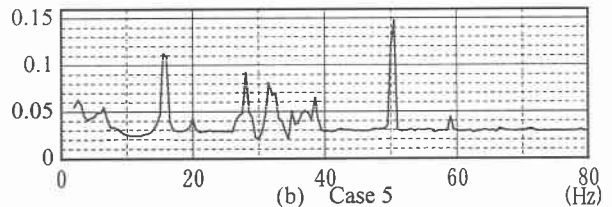
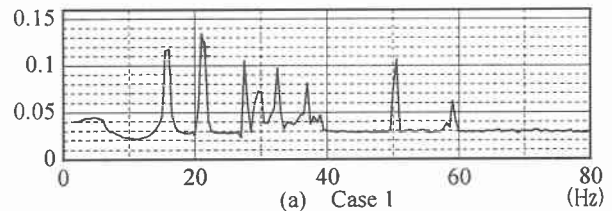


図-5 分散値スペクトル (測点 1)

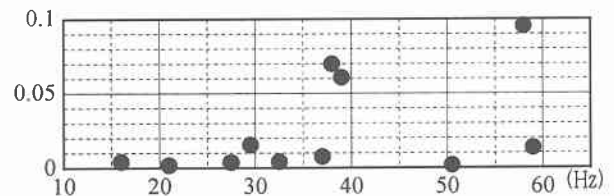


図-6 減衰定数の推定