

阪神高速 * * * 高架橋 簡易振動計測のレポート

2007 年 3 月

島田 静雄 (中日本建設コンサルタント株式会社)
橋本 保則 (滝上工業株式会社)
山下 裕康 (株式会社東京測器研究所)

| | |
|-------------------------------|----|
| 1. 概要 | 1 |
| 2. 測定対象の橋梁と測定箇所 (一部省略) | 2 |
| 3. 計測作業とモニタリング | 3 |
| 4. 解析結果説明と所見 | 5 |
| 付録A : バイプログラムとランニングスペクトル | 7 |
| 付録B : 加速度・速度・変位のグラフとスペクトルのグラフ | 12 |

1. 概要

橋梁をはじめ、構造物の健全度を調査・分析する一つの方法に、振動の具合を測定し、その性質を分析する方法がある。「石橋を叩いて渡る」という諺は、丈夫に見える石橋でも、叩いてその感触から安全が確認できることを言う。では、どのようであれば安全であるかの具体的な知見は、経験的に覚えるしか方法がない。この方法を工学的計測システムと解析システムに構築することの開発研究は、筆者らの研究グループによって進められてきた。振動は加速度計によって電子的に記録され、その感触の分析はコンピュータで数値化処理をする。その工学的感触から安全性などの知見を引き出すには、多くの経験を積み上げ、それらと比較する必要がある。

阪神高速道路 * * * の高架橋は、200*年、一般通行を遮断して、舗装リフレッシュ工事が行われ、その機会を利用して種々の調査と計測が行われた。表題にある簡易振動計測は、言わば、飛び入りの許可を得て測定を行ったものである。一般に、自動車専用道路は歩道を持たないので、通常の供用状態では人が安全に作業できる空間がなく、また、路面上で調査作業を実施することは、安全対策の面で問題が複雑になる。現場での測定作業は、計測器の小型化が進んだことによって非常に簡易化されてきたが、構造物の管理者側の協力が必要であるので、測定の機会は未だ多くない。今回の測定は、当該の計測システムの完成度を高めるため、なかば、試験研究の意義を持って実施した。

振動解析においてはコンピュータの利用が欠かせないので、計測システムと密接な関連をもって解析システムを開発する必要がある。つまり、解析システムは、市販のアプリケーションとして発売されるものではない。ただし、解析システムのソフトウェア開発は、市販のプログラミング言語を使い、一般的なパソコンで利用できる汎用性が望ましい。解析用のソフトウェアは数種類あるが、このレポートで使用したのは"DataPreviewer"と"DataIntegral"である。どちらも Visual Basic 6.0 (VB6) でコーディングした。データ解析作業に利用していると、部分的にも頻繁にソースコードの変更が必要になる。解析上の特殊な要求に弾力的に対応するには、VB6 は扱い易いプログラミング言語である。

振動データの解析結果から対象構造物の力学的性質を判定するときは、表面上の数値的性質が持つ裏の意義にまで踏み込む必要があって、その構造物の設計理論、建設、補修などを含めた総合で推論することになる。これには、同じような多くの測定結果の知見を傍証として利用できるのが望ましい。今回の測定結果は、今後、同じような構造物の測定の参考になるデータとして、積み上げる一つの資料としたい。

2. 測定対象の橋梁と測定箇所（一部省略）



図3： 測定対象橋梁の主桁構造

3. 計測作業とモニタリング

測定の作業性から決める要求仕様

従来、構造物の振動測定は大掛かりな設備を必要とした。振動測定は、ゴミ的なデータを拾わないように注意しなければならないので、センサー自体を精密化すると同時に、設置方法にも注意が必要になる。地震計に見るように、振動計測システムは環境の整った室内での利用を前提とすることが多いので、現場にセンサーを持ち込む測定作業は大きな制約を受ける。その問題は二つある。第一は、センサー・アンプ・レコーダなどのシステム構成が寸法的に大きく、持ち運びと操作が簡単ではないこと、第二は、安定した電源の供給が難しくなることである。この制限は、電子化技術の飛躍的な進歩によって改善されてきている。第一の問題のうち、センサーの小型化では、歪みゲージ式の加速度計が有利である。欠点として、クランプ機構を持たないので、輸送などで乱暴な扱いに注意しなければならない。構造物では低い振動数の計測が重要であり、かつ振動レベルも低いので、機械振動や音響測定に使う小型の高振動数計測用のセンサーは向かない。また、発電型の速度計は、センサー自体が大きく、また重い。第二の電源の問題は、消費電力の小さな電子システムの開発に負うところが大きい。一昔前は、現場に100VのAC電源を引き込む必要があったので、計測システムの重量の大半はトランス類が占めていた。自動車バッテリーで機能するアンプやレコーダ類が利用できるようになったことは革命的ではあっても、自動車乗り入れできない現場では利用ができない。この点に関しては、モバイルパソコンで実感できるように、電池駆動の電子システムの進歩がもたらした恩恵は大きい(写真1参照)。ただし、電池は消耗があるので、長時間の計測作業には向かない。逆に言えば、短い時間で作業できる効率的な計測システムを設計することが課題となる。



図5： 測定状況

【解説】道路幅員は上下線合わせて4車線、後方に舗装アスファルトを載せたダンプカーの進入が見え、これが振動の加振をする。その通過時間を含めた約40秒間を1測定単位とする。橋梁は壁高欄で区切られているので、測定作業を外から制御できない。壁高欄上に振動波形モニタ用のモバイルパソコン、その手前に小型レコーダが見える。小型の三成分加速度計は舗装面上に置かれ、ケーブルでレコーダに接続されている。全体の持ち運び用の小型キャリングケースが足元にある。計測作業は実質的には一人で行うこともできる。ここでは、写真を撮影したもう一人の測定協力者が手前にいる。

測定単位

三成分一体型の加速度計を使う振動データは、レコーダに挿入したフラッシュメモリ(CFカード)に、時間的に連続してデジタル記録される。物理的な**1測定単位**は、約40秒長さに区切ってファイルに記録されるので、このファイル単位を実質的な測定単位として標準化した。一方、解析単位は、連続した記録から約20秒間のデータを切り出して詳細解析に載せる。20秒長さは、仮に荷重車が速度10m/secで走行すると約200m長さの走行秒数になるので、長い橋梁であっても、一台の荷重車が橋梁に進入して通過するまでの経過を記録できる充分の時間長さである。1測定単位は、前後に10秒の余裕時間を加えたものに設計してある。ファイル単位に分割された長いデータを、論理的に一続きの記録とする扱いも可能ではある。しかし、作業性から見れば、荷重車の通行が間歇的であるので、次の荷重車が来るまでの待ち時間に無駄な計測をしないような、40秒を区切りとする単位が能率的になる。この測定単位で、どの箇所、何回測定すればよいかは現場の状況による。***高架橋の場合は、2箇所それぞれ4~5回の計測を行い、測定準備から終了撤去まで約30分弱であった。

計測時のモニタリング

振動測定においては、計測器が正常に機能していることを確認する手段が必須である。最も理解しやすい方法がオシログラフ(装置のこと)でのモニタリングである。モバイルパソコンは、オシログラフに代わる装置に位置付ける。ただし、測定作業に習熟していれば、モバイルパソコンを持ち込むまでもなく、レコーダのLED表示ランプを見て確認することができる。

データ確認のソフトウェア

プログラム"**DataPreviewer**"と"**DataIntegral**"は、現場作業から戻って、室内作業の段階で計測結果の概要を見るソフトウェアである。測定の生データはレコーダのCFカードにファイル化して記録されるので、それを取り出してパソコン側にファイルをコピーする。計測条件などの現場情報は野帳に記録するが、それもテキストファイルにまとめ、全体を名前付きフォルダにまとめて保管用データ(アーカイブ)として管理する。従来の振動測定は、眼に見えるオシログラムを保存データとして管理した。データ管理が電子化されたことで、逆に、眼に見えるオシログラムを補助的な管理データとして作成する必要がある。この目的に使うプログラムがDataPreviewerである。これは、1測定単位の生の波形全体を**バイプログラム**としてグラフ化する。また、短い時間区間でスペクトル解析をし、その区間を時間的にズラシながらグラフ化した**ランニングスペクトル**を作成する。それを見れば振動現象の概略が読取れるので、解析に適する区間を決めて**解析作業用ファイル**に切り出す。このファイルは元のバイナリデータから加速度値に変換し、測定日時や測定箇所などの管理データが記録される。プログラムDataIntegralは、その解析作業用ファイルを読み出し、加速度から数値積分で速度及び変位を計算して図形表示する。同時に、スペクトル図の作成と、卓越振動数を拾い出してリストする。ここまでの処理を行えば、対象とした構造物の振動性状のあらましを判定することができる。今回の測定で得られた**バイプログラム**、**ランニングスペクトル**、**速度と変位のグラフ**、**スペクトル図**などは、ページ数が多くなるので、付録としてこのレポートの後半に添付した。

グラフの見方と判断のしかた

橋梁構造物の振動は、電気機械装置とは異なって、自分自身が振動源になるのではなく、外的な攪乱力に引きずられて起こる。したがって、振動は、場所的にも、時間的にも、また方向的にも、種々の異なった顔を持つ。これを概観する目的に、バイプログラムとランニングスペクトルを用いる。卓越振動の性質を求めるためにスペクトル解析をすると、必ずしも同じ振動数が同定されることはない。これは、振動の性質に統計解析で言う**確率分布**的な性質があるためである。一箇所の測定で通行車両の異なる数回の測定を行うと、結果に揺れがあるのが確率分布の性質である。スペクトル解析をすると、尖鋭な卓越振動数付近に幾つかのピークが見られ、全体としてなだらかな山を示す。したがって、スペクトルは、座標軸の尺度を線形尺度と両対数尺度で描いた二つのグラフを対にして図化してあり、対数尺度でグラフ化した図から、概略の山を読取ることができる。スペクトルの数値計算結果から極大値を示す卓越振動数を拾い出してリストが得られるが、上のような背景を考慮して、卓越振動数の有効数字は2桁程度に抑えて解釈する。なお、橋梁の場合には固有振動数と共に減衰係数を同定することに興味の焦点がある。この解析には別のプログラム"**TimeProcess**"を用いるが、このレポートでは扱っていない。

4. 解析結果説明と所見

- 原始測定データは重要な資料であるので、明らかに無意味なデータを除き、データベース管理を考慮する。電子化データは、そのままでは眼に見えないので、管理目的を持って、全体像が分かるハードコピーが必要である。この目的に、全測定データのバイプログラムとランニングスペクトルとを作図する。本レポートでは付属資料Aとして添付した。
- 現場におけるデータサンプリング間隔は、0.005 秒（周期にして 200Hz）を標準とするが、今回の測定では、F001、F002 の二測定単位を除き、0.01 秒で計測した。卓越振動数の概略を求めることは可能であったが、ランニングスペクトルの周波数分解能がやや劣る。ランニングスペクトルを見れば、ピークが縦に揃う周波数位置が卓越振動数であることが分かる。さらに卓越振動数の拾い出しリストからその数値が同定できる。しかし、F001 と F002 を除くと、残りのランニングスペクトル図では、ピークの分解能が良くない。このことから、今後の測定作業では、サンプリング間隔 0.005 秒を標準とするように提案したい。
- 同じ箇所での測定であっても、測定単位ごとに揺れがある。卓越振動数の拾い出しは、二つのプログラム DataPreviewer と DataIntegral で行うことができる。概略の結果は下の表に示す。幾つかの極値が計算されるが、それが有効な振動数であるか否かの判定は、ランニングスペクトルと概略スペクトル解析のグラフで当たって同定した。なお、ランニングスペクトルは加速度データからの解析図であるが、概略スペクトルグラフは速度データからの図化であって、相対的に高周波成分がカットされる。

表 1： 概略の卓越振動数計算値(Hz)

| 測定位置 | 測定番号 | 橋軸方向 | 橋軸直角方向 | 鉛直方向 |
|-------|------|----------|-------------|-----------------|
| * * 1 | F001 | 0.64/1.5 | 0.68/4.7 | 4.9/8.4 |
| | F002 | 2.8 | 1.8/4.5/8.4 | 4.3/4.8/8.4 |
| | S003 | - | - | 3.5/4.6 |
| | F004 | 3.4 | | 3.4/4.2/4.7 |
| | F005 | 3.5 | 8.1/8.7 | 4.4/4.5 |
| * * 2 | F007 | 2.6/3.6 | 1.5 | 2.6/3.6/4.8/8.1 |
| | F009 | 0.6/1.0 | 1.8 | 3.9/4.7 |
| | F010 | 1.0/3.5 | 1.7 | 3.9 |
| | F011 | 3.1 | 1.7 | 3.1 |

- スペクトルの計算値から単純に極大値を示す振動数を拾い出したリストが表 1 である。幾つかの卓越振動数があるように見えるが、付録 B のスペクトル図を参考にして判断すると、次のように判定することができる。上下動は、4.8Hz と 8Hz を中心とした二つの卓越振動数がある。前者は通常のタワミ振動、後者は橋軸方向を軸とした捩れ振動であると推定できる。
- 橋軸直角方向の振動は、橋全体が水平面内に曲がる変形は考えられないので、橋脚で支えられた橋上部全体が水平に傾く振動であって、1.7~1.8Hz が卓越している。数値積分でその強さは、守 224 の測点で顕著である。この振動数は、一本足の橋脚と基礎を含めた全体の横揺れであると判定した。数値積分で変位を計算したグラフでは、水平方向の振動に 0.6Hz 前後の低い振動が見られる。数値積分では 0.5Hz 以下をカットしたので、解析上、その近傍のドリフトが残ったと考えられなくもない。長周期成分の振動の同定は、再測定の機会があれば重点的に検討したい。
- 鉛直方向の振動は、幾つもの卓越振動数が計算されるが、これは加振を与えるダンブカーの重量と上り下りの走行車線の違いなどで、確率的に異なって現われるためである。スペクトルの波形は非常に凹凸が激しいグラフであるが、全体として見れば 4.7~4.9Hz に中心があり、これが曲げの第 1 次の固有振動数であると判定できる。

- 鉛直方向の卓越振動数 f は、設計時のタワミ制限によって支間 L との間に統計的な性質がある。タワミ制限が $1/2000$ の場合、 $f = 22/L$ である。対象橋梁の支間は約 34m であるので、これから求めた卓越振動数は 3.8Hz である。結論として、対象構造物の曲げ剛度は十分に高いと言える。この剛度は、壁高欄の曲げ剛性がかなり効いているためと考えられる。
- 鉛直方向の卓越振動数には、かすかではあるが $8.1 \sim 8.4\text{Hz}$ の値を同定することができる。これは、橋桁全体の橋軸回りの捩れ振動であると判定できる。曲げ変形の 2 次振動であれば、1 次の振動数の 4 倍、約 20Hz になるからである。この振動数から、橋梁全体の捩れ剛性が計算できて、換算 2 主桁橋としての分配係数が得られる。その係数は $q_{11}=0.68$ 、 $q_{12}=0.32$ と得られ、かなり捩れ剛性が高いことが認められる（参考文献：島田静雄、易しくない振動調査法 11、橋梁と都市プロジェクト 2006 年 11 月号）
- 加速度記録から数値積分で速度及び変位の計算を行った結果のグラフを付録 B に示す。測定番号を通して、加速度・速度・変位の最大最小値を表 2 にまとめる。センサの感度が低いので、解析精度の信頼性はやや劣るが、数値の傾向としては納得できる値が得られた。ただし、センサ感度の正負の向きに注意を払わなかったため、どの向きが正の方向であるかが不明になった。今後はセンサの正負向きの較正に注意することを検討したい。

表 2：加速度・速度・変位の測定並びに計算数値

| 測定位置 | 計算調整後の加速度（単位 m/sec^2 ） | | | | | |
|------|--|-------|-------------|-------|-----------|-------|
| | Ch1（橋軸方向） | | Ch2（橋軸直角方向） | | Ch3（鉛直方向） | |
| | Max | Min | Max | Min | Max | Min |
| ** 1 | 0.14 | -0.13 | 0.18 | -0.17 | 0.14 | -0.16 |
| ** 2 | 0.02 | -0.02 | 0.04 | -0.07 | 0.09 | -0.11 |

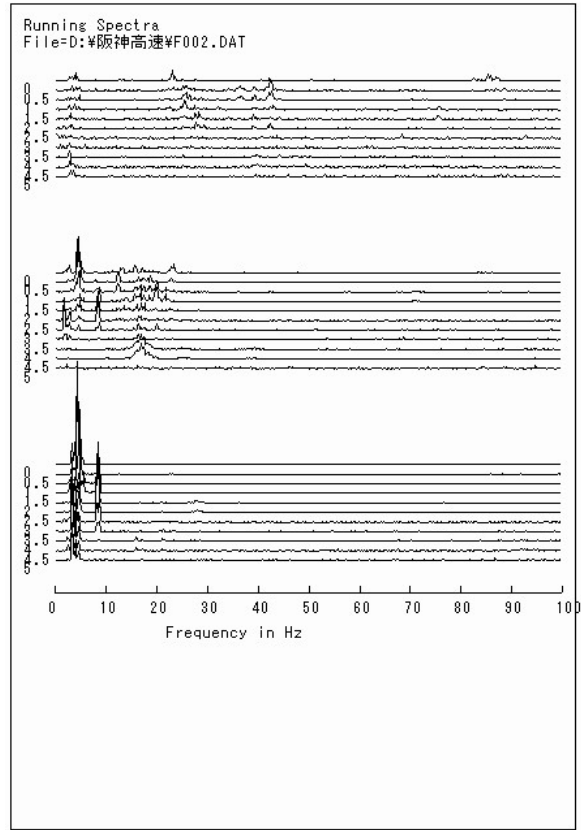
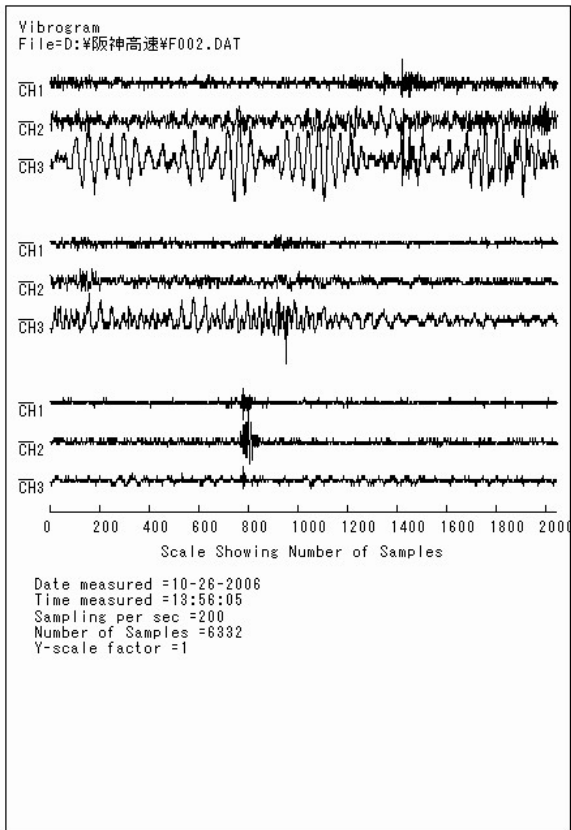
| 測定位置 | 速度（単位 cm/sec ） | | | | | |
|------|--------------------------------|-------|-------------|-------|-----------|-------|
| | Ch1（橋軸方向） | | Ch2（橋軸直角方向） | | Ch3（鉛直方向） | |
| | Max | Min | Max | Min | Max | Min |
| ** 1 | 0.24 | -0.18 | 0.27 | -0.28 | 0.65 | -0.67 |
| ** 2 | 0.05 | -0.06 | 0.16 | -0.16 | 0.73 | -0.36 |

| 測定位置 | 変位（単位 mm ） | | | | | |
|------|---------------------|-------|-------------|-------|-----------|-------|
| | Ch1（橋軸方向） | | Ch2（橋軸直角方向） | | Ch3（鉛直方向） | |
| | Max | Min | Max | Min | Max | Min |
| ** 1 | 0.27 | -0.32 | 0.44 | -0.37 | 0.91 | -0.87 |
| ** 2 | 0.08 | -0.05 | 0.20 | -0.14 | 0.30 | -0.42 |

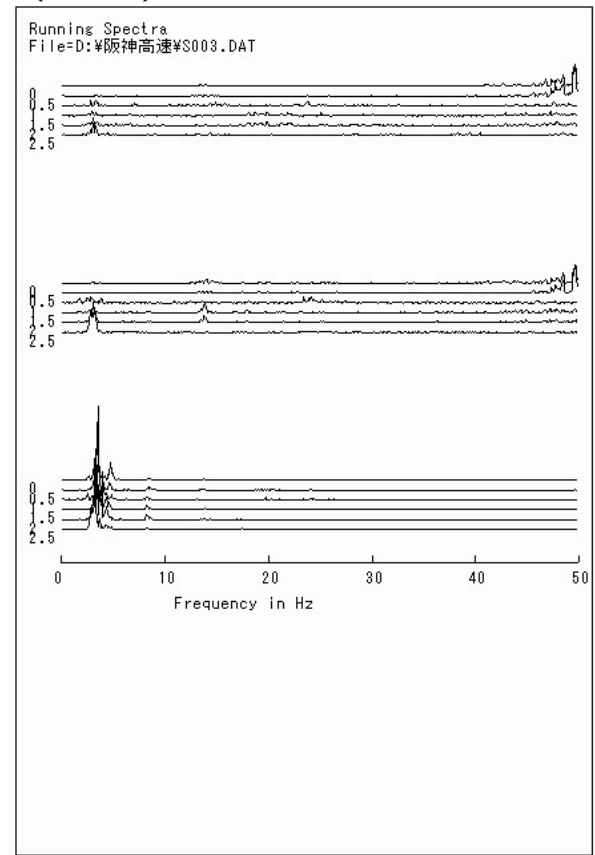
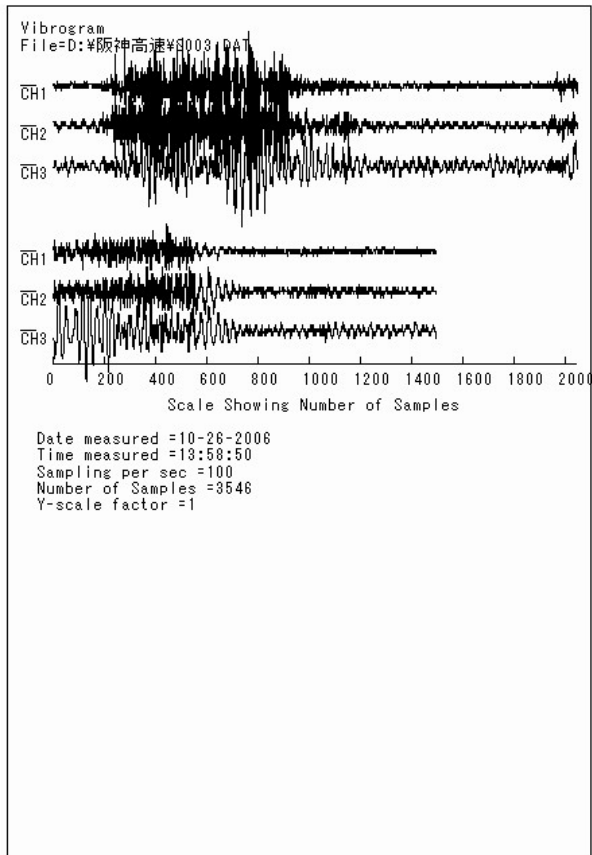
- 加速度記録は高い周波数を強調するが、数値積分で速度、さらには変位を求めると、細かな振動成分が均される。変位の大きさは、3 成分ともほぼ同じであるが、道路幅に対する荷重車の走行位置に影響されていると推定した。本高架橋梁の橋脚は一本柱であるので、橋軸直角方向変位 (Ch2) が比較的大きい場合がある。その最大値は、全振幅で 0.8mm である。鉛直変位の最大全振幅は 1.8mm である。もっと大きく出ることを予測したが、センサ設置箇所が荷重車の走行車線から離れていることもあって、曲げ変形の計測ではなく、橋全体の剛体的な運動が強調されたと推定した。

レポート本文終り。以降は付録である

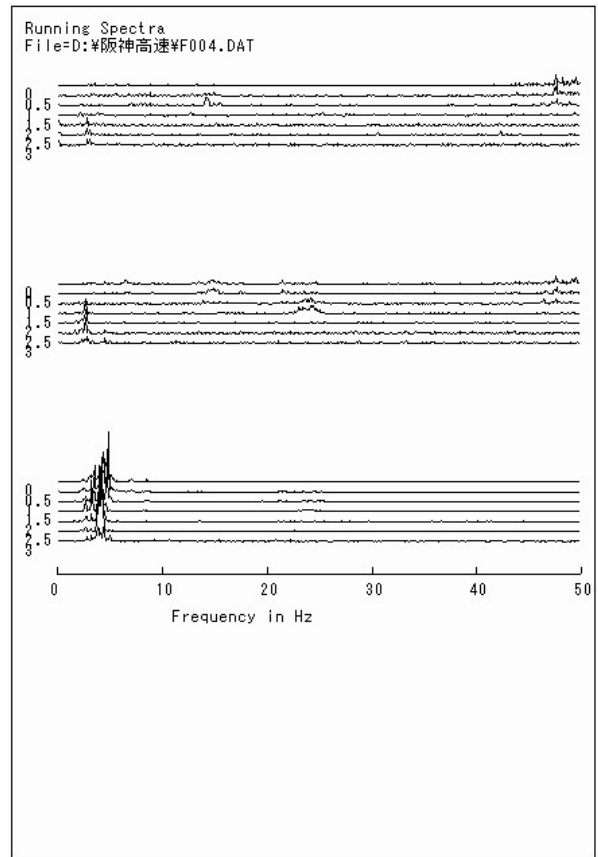
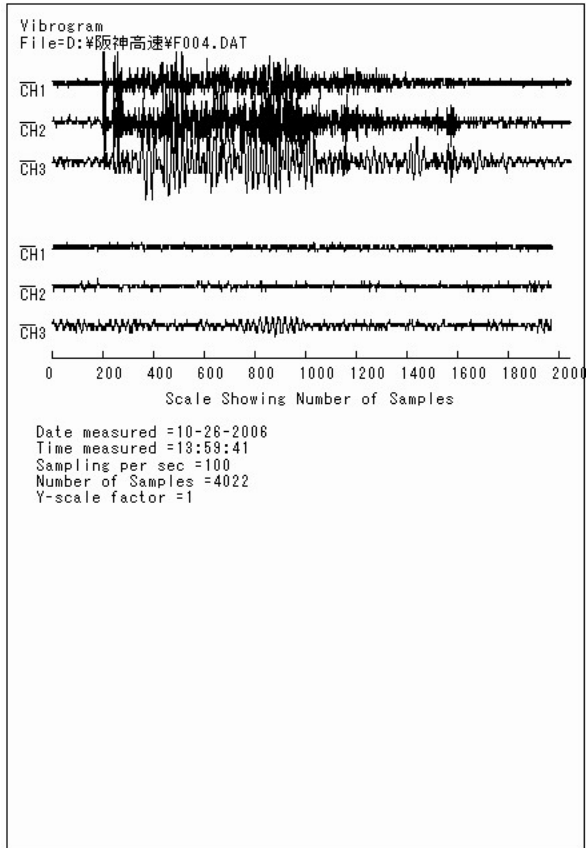
測定ファイル F002 (** 1)



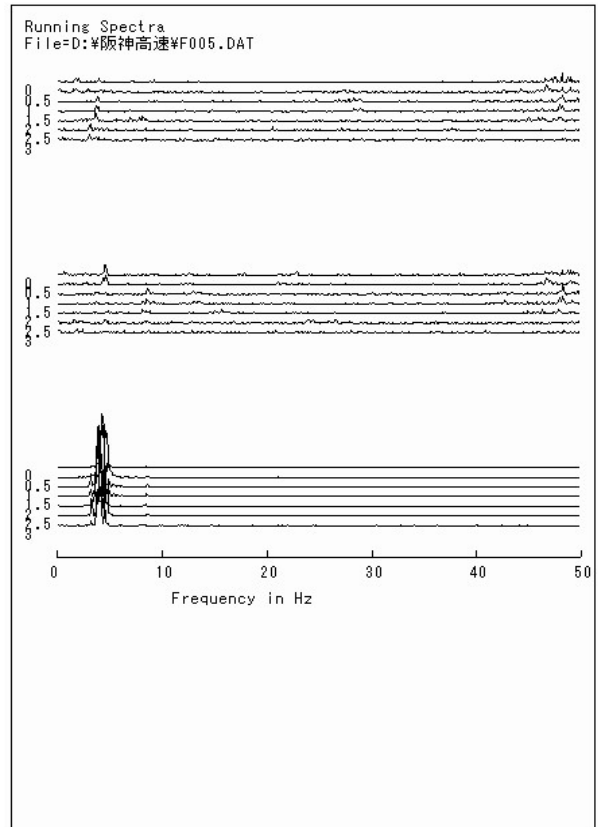
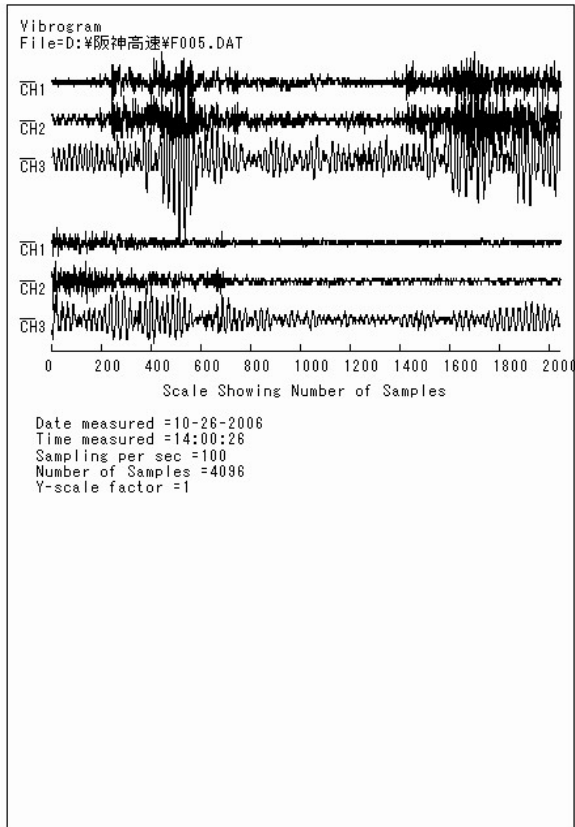
測定ファイル S003 (** 1)



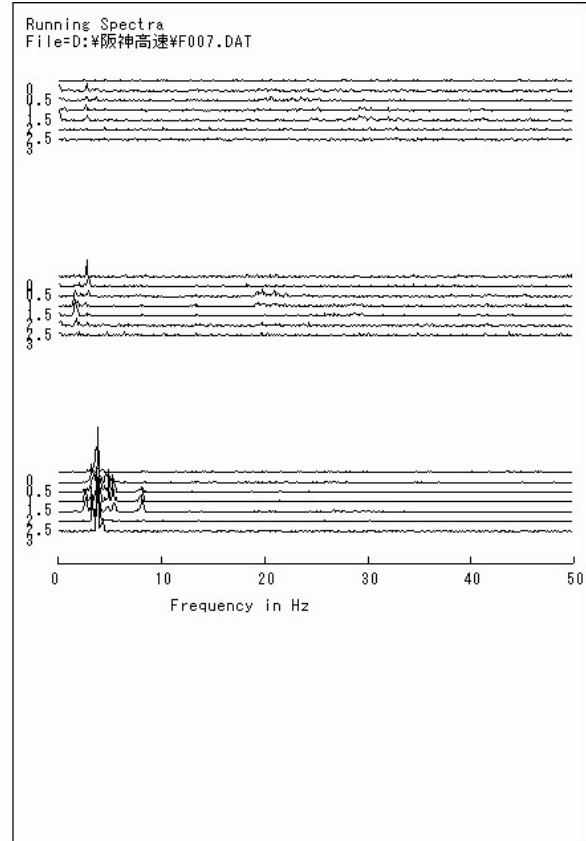
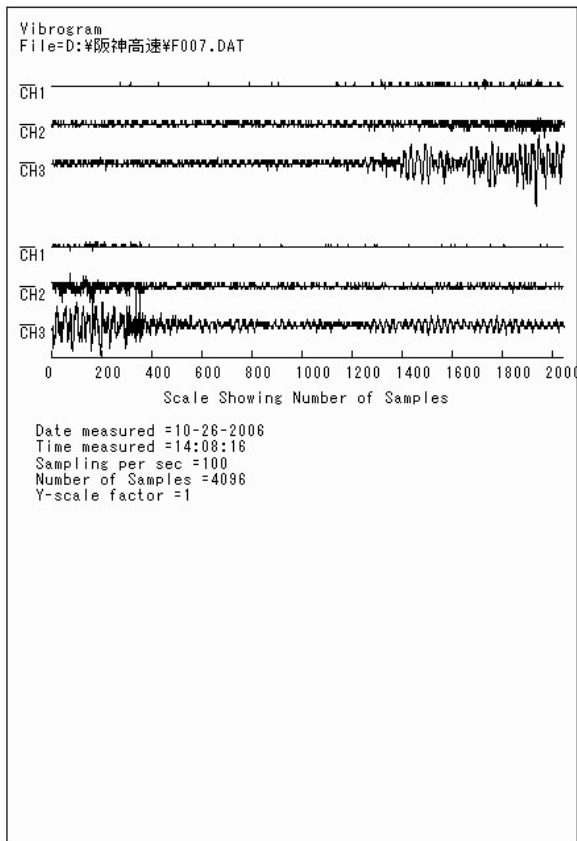
測定ファイル F004 (** 1)



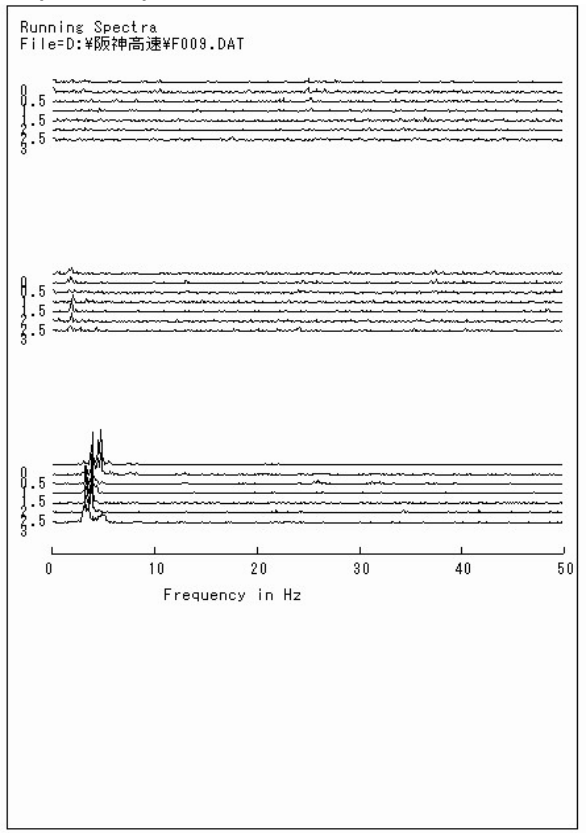
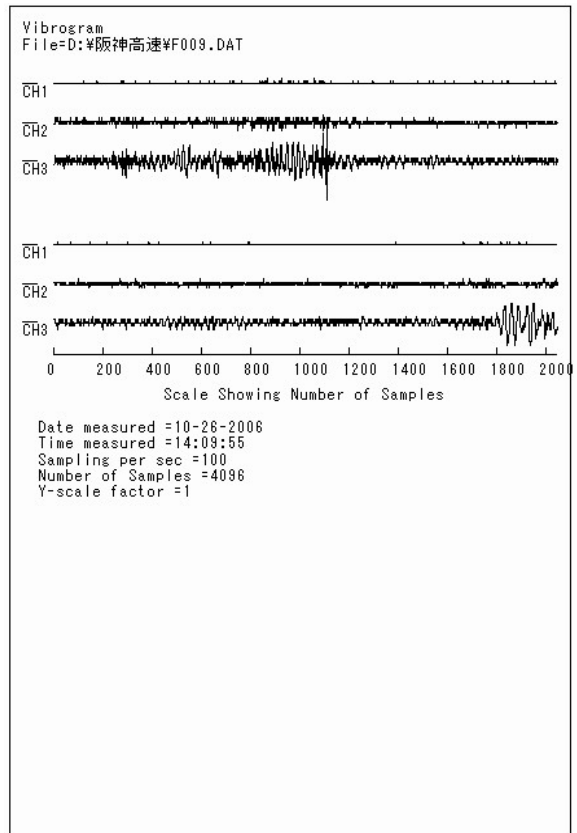
測定ファイル F005 (** 1)



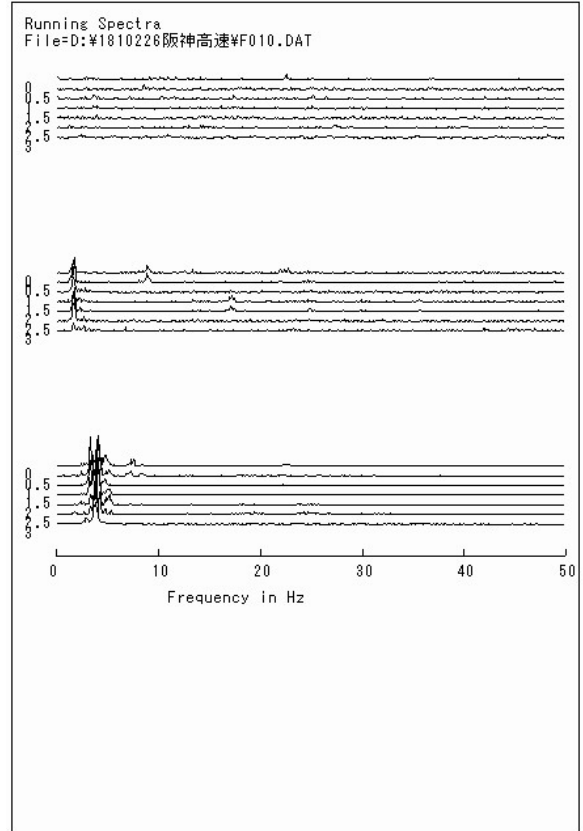
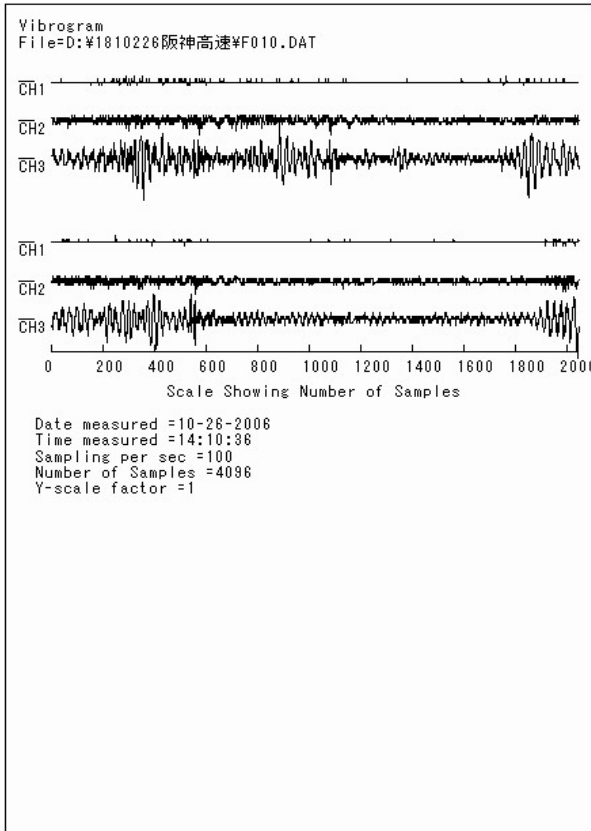
測定ファイル F007 (** 2)



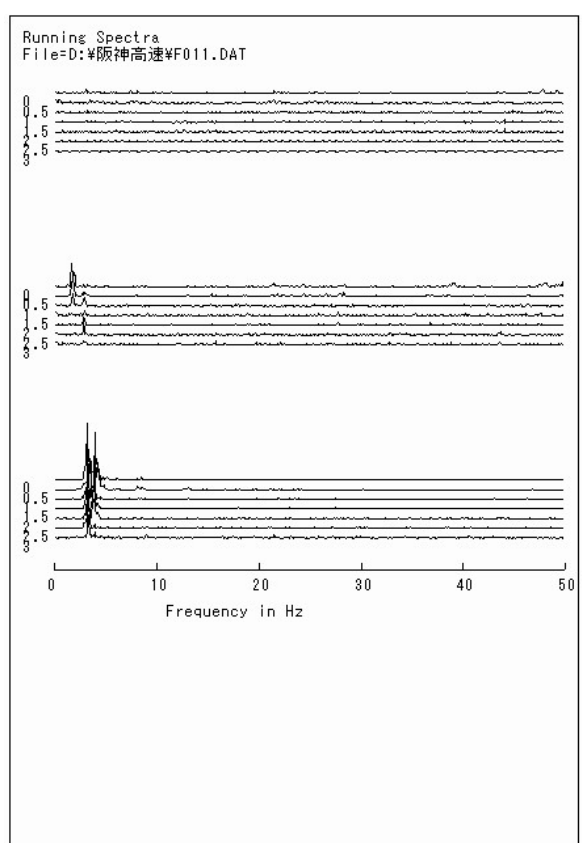
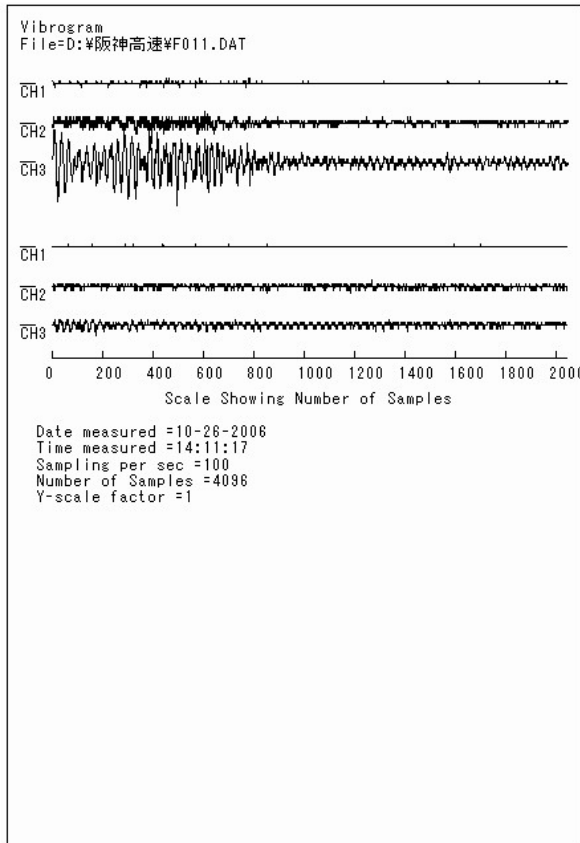
測定ファイル F009 (** 2)



測定ファイル F010 (** 2)



測定ファイル F011 (** 2)



////

付録 B : 加速度・速度・変位グラフ(左) とスペクトル図(右)

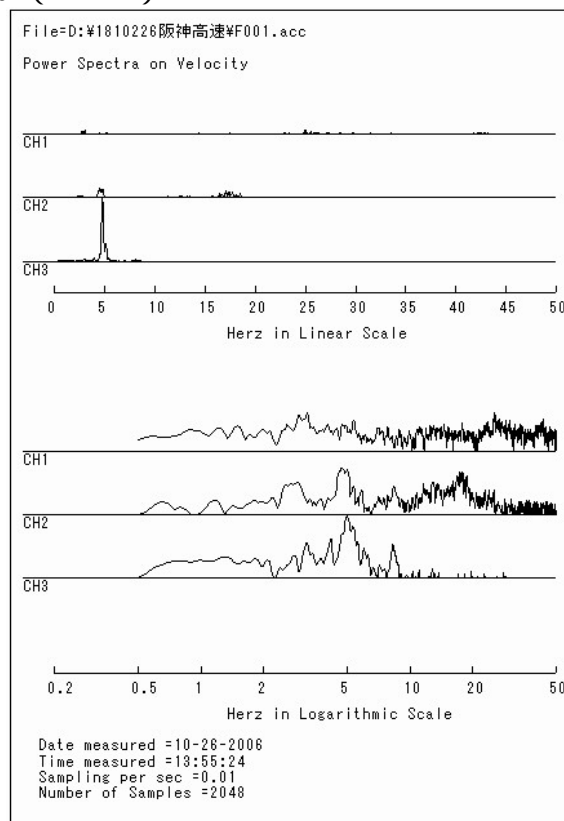
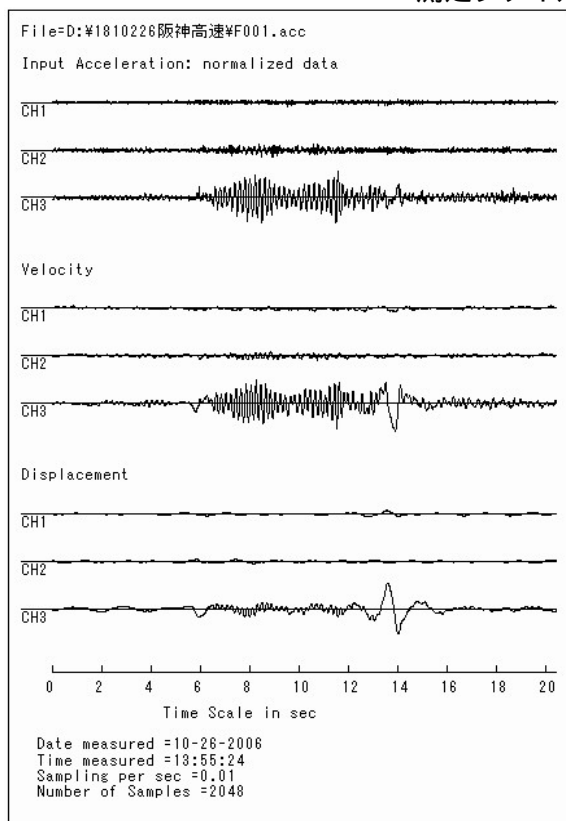
解説

以下に示した図は、振動の測定単位ごとのデータから、解析用に切り出した 20 秒長さのデータを使って作成したグラフであって、左右一組を見比べながら振動のあらましを観察するように作成した。測定箇所は 2 箇所であって括弧書きで(** 1) と(** 2) と記してある。同じ測定箇所で、加振するダンパーの通行を見ながら 4 ~ 5 回の測定を行い、測定ファイル番号順(F***) に並べてある。

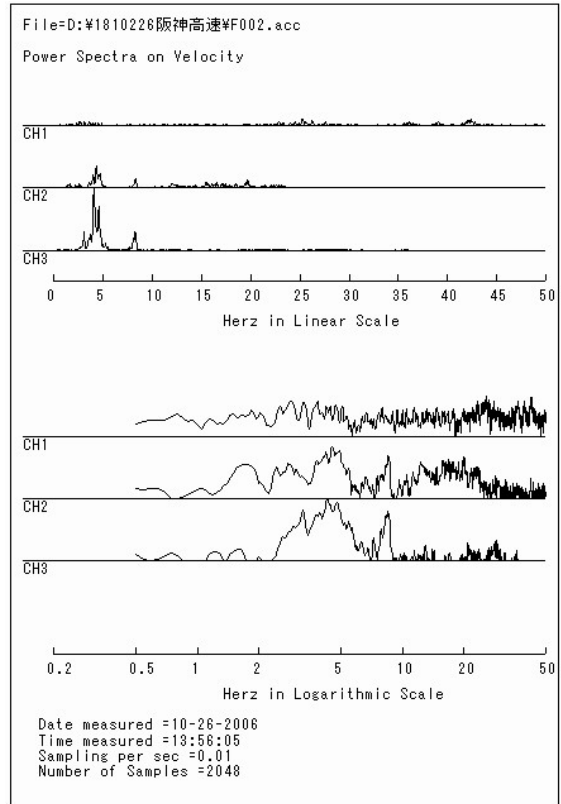
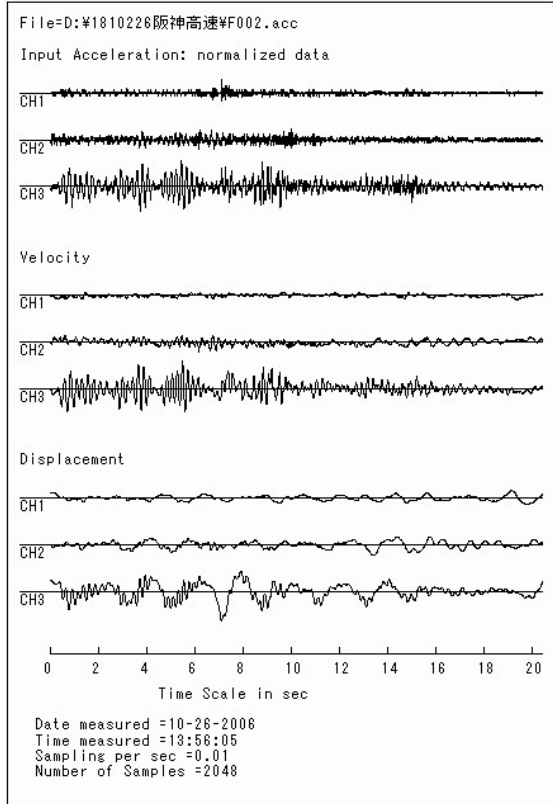
左のグラフは、3 成分の振動方向 (Ch1 : 橋軸方向水平動)、(Ch2 : 橋軸直角方向水平動)、(Ch3 : 鉛直方向振動) の加速度波形・速度・変位を、数値積分をして計算し、並べて作図してある。グラフの横軸長さが約 20 秒であるので、このグラフから大体の卓越振動数を判断することができる。

右のグラフは、速度に変換したデータからパワースペクトルを計算して図化したものである。作図の尺度は、上半分が振動数とスペクトル強さを線形尺度で描いたもの、下半分に同じデータから尺度を縦横ともに両対数で作図したものである。橋梁構造物の振動は外的な攪乱力に引きずられる応答振動であるので、グラフそのものは変動の激しい曲線になり、振動のピークの位置は揺れがある。対数軸で表示したグラフで、全体として幅を持った山の箇所が卓越振動を示し、山が鋭ければ、その振動の減衰係数が小さいことが分かる。スペクトル強さの数値は、作業用のファイルに書き出されるので、このグラフとの対応を判断して卓越振動数を同定する。見掛け上、近接して複数の卓越振動数が見られる場合がある。これらが別の振動モードに属するのか、それとも、外的な攪乱力に影響された変動であるかの判断は、ランニングスペクトルも参考にして判定する。

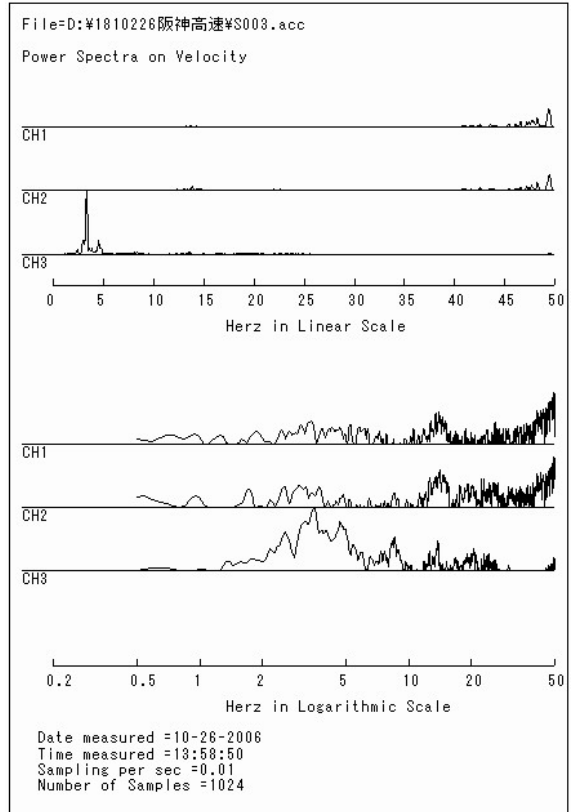
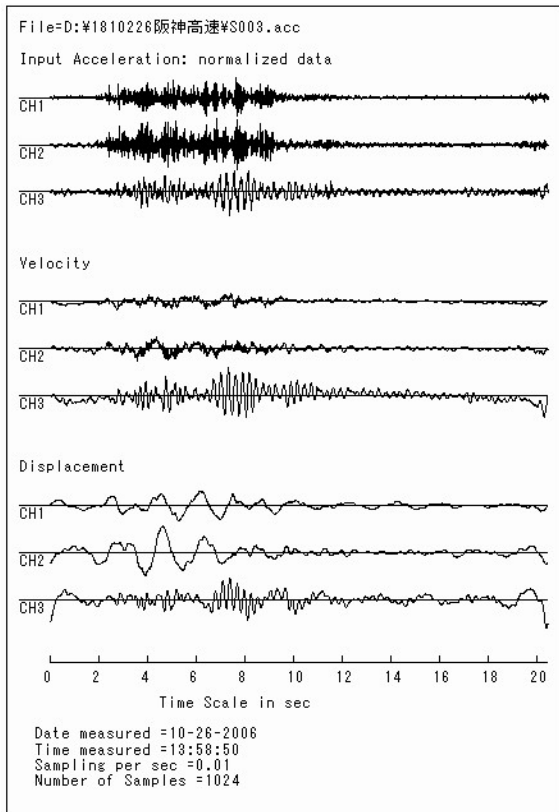
測定ファイル F001 (** 1)



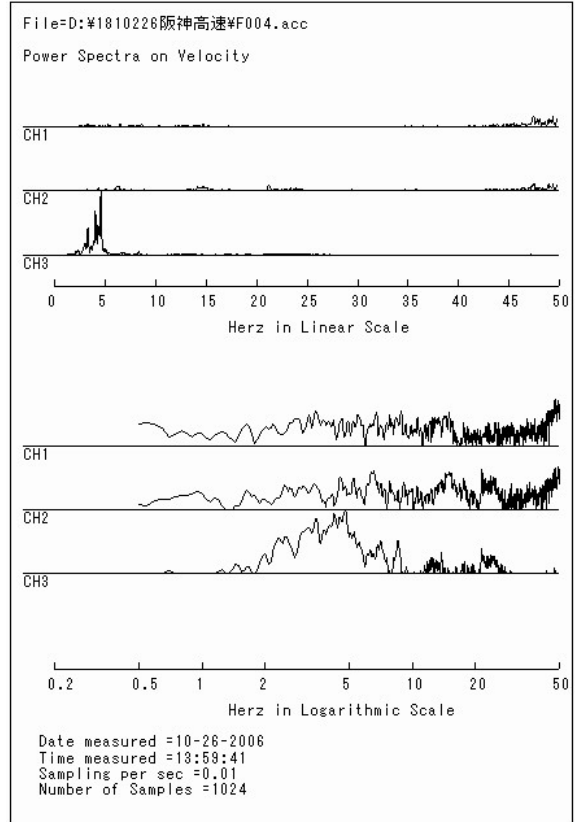
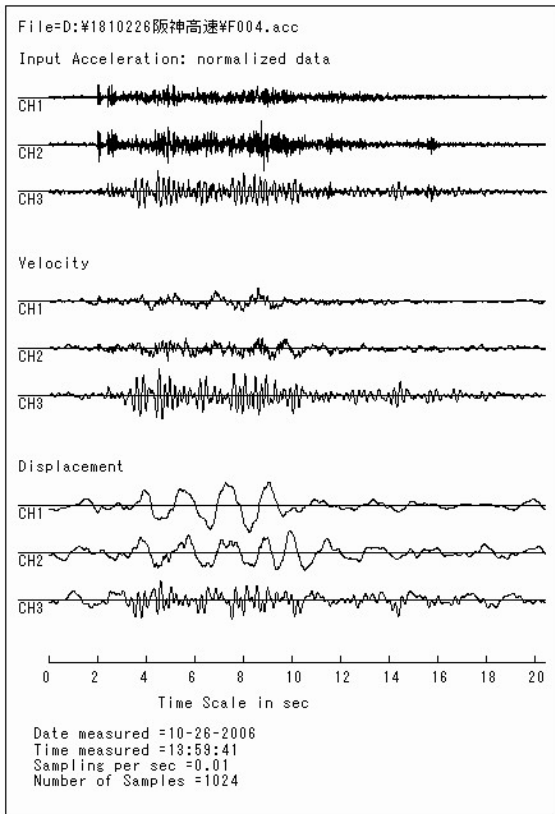
測定ファイル F002 (** 1)



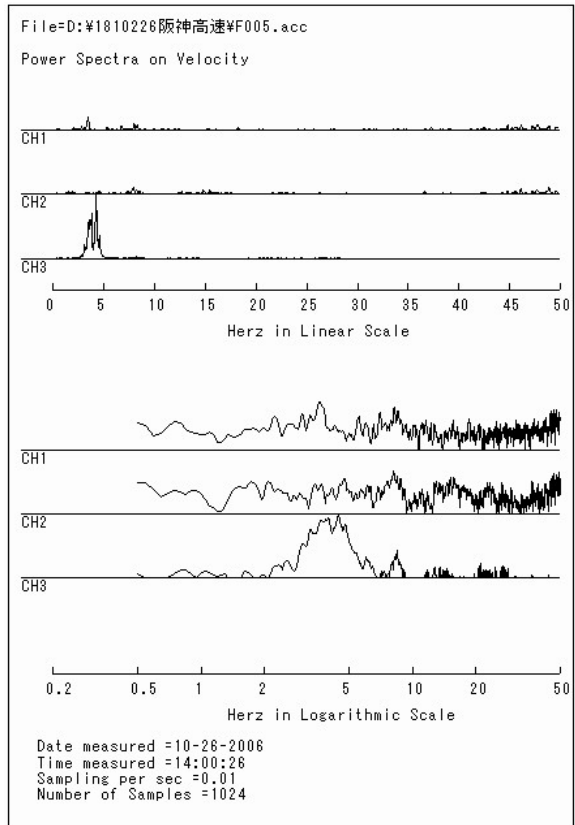
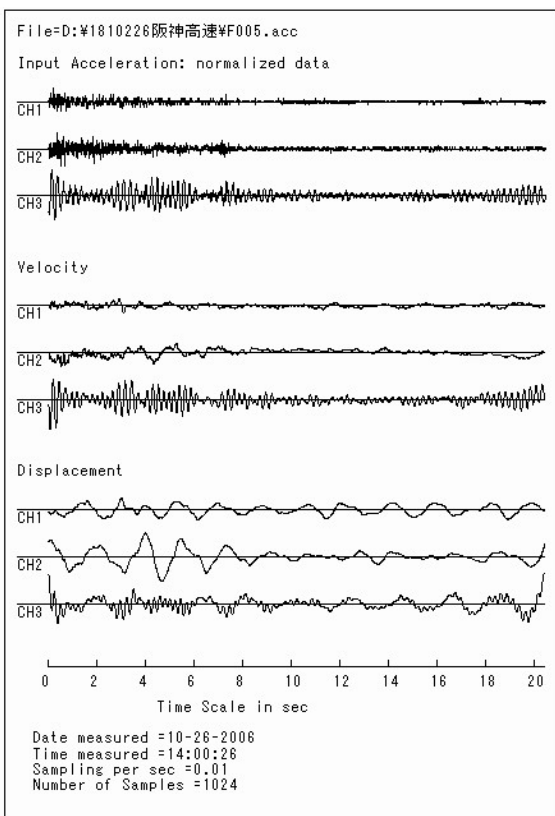
測定ファイル S003 (** 1)



測定ファイル F004 (** 1)

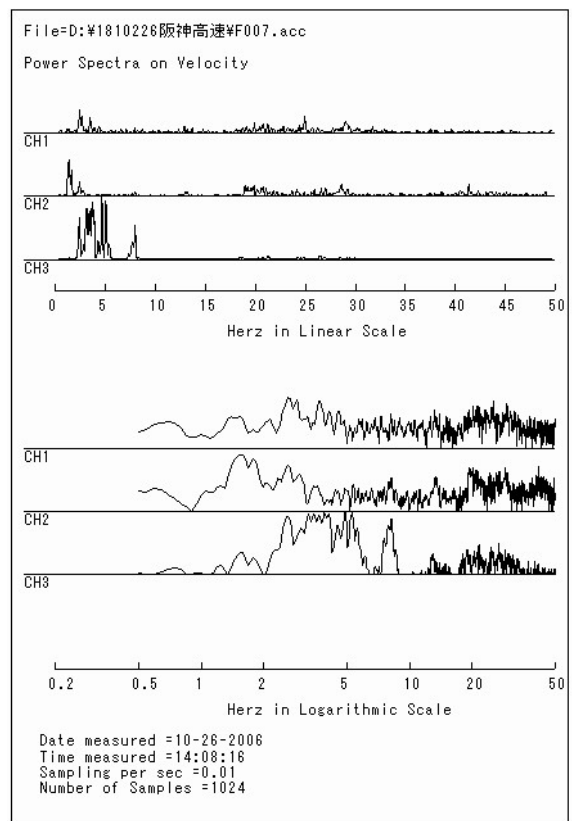
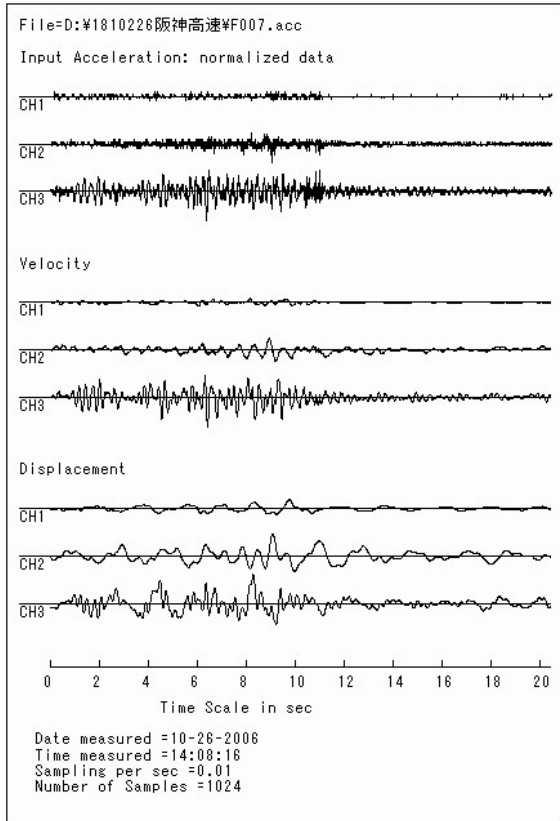


測定ファイル F005 (** 1)

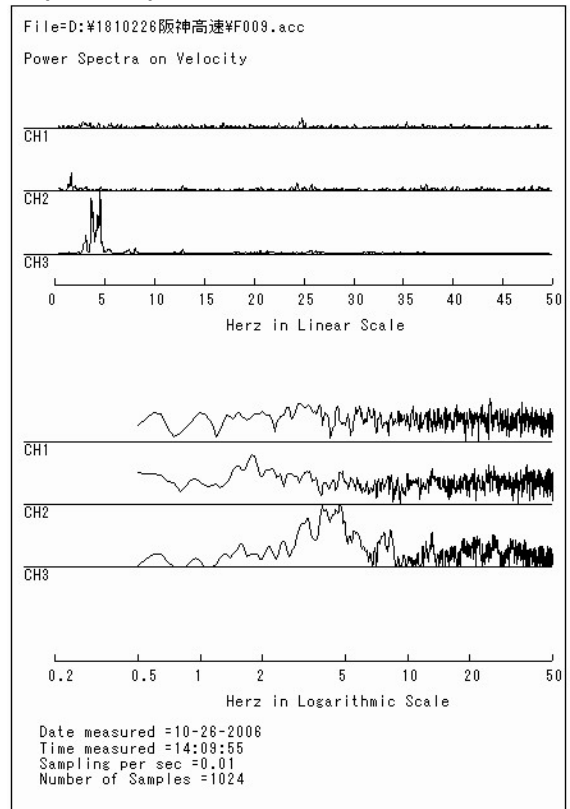
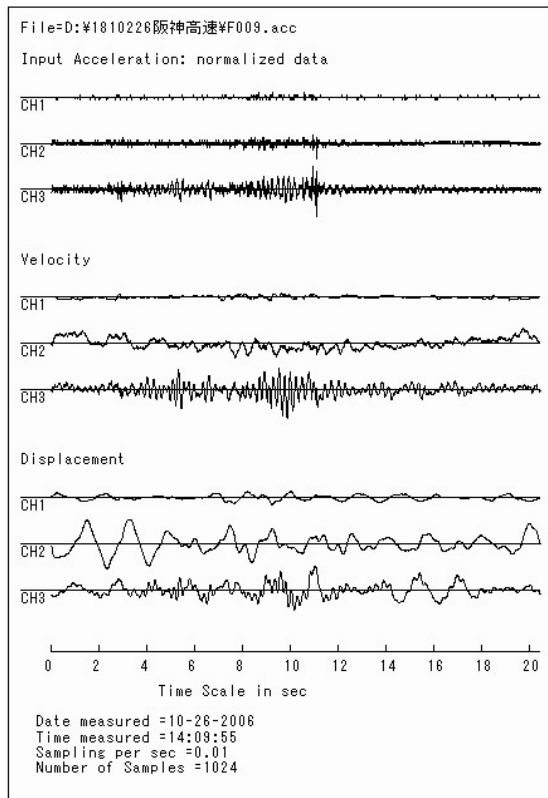


//

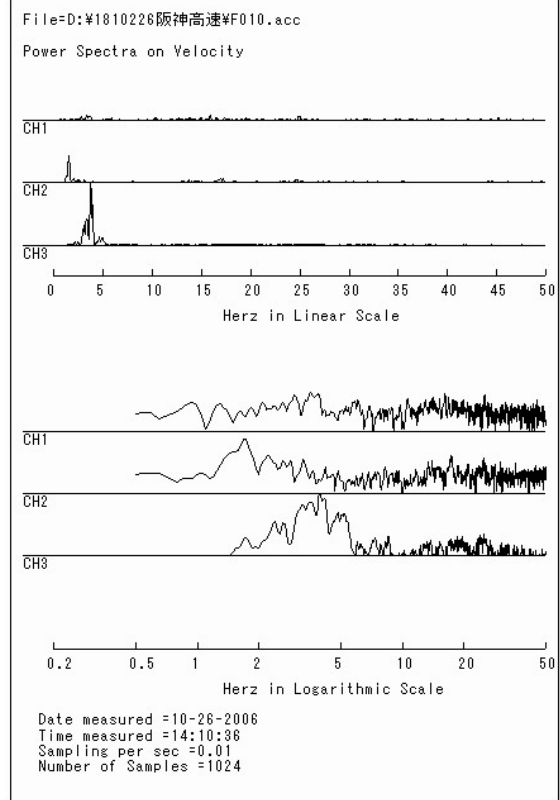
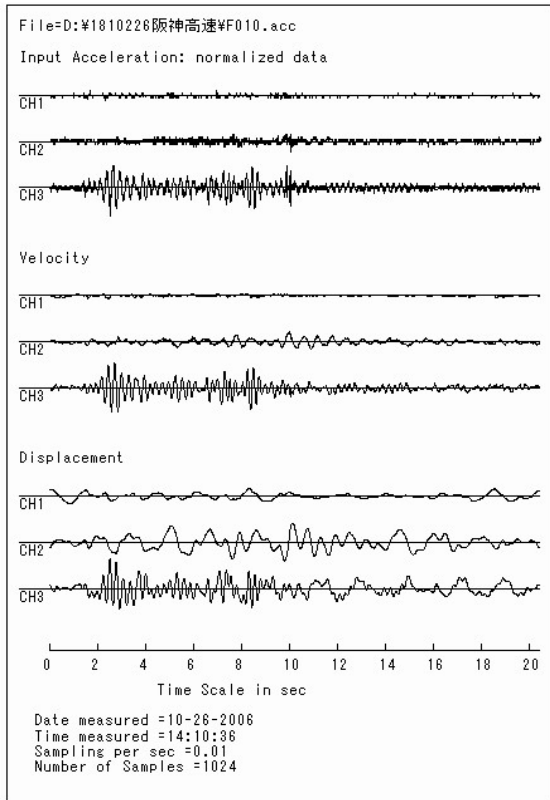
測定ファイル F007 (** 2)



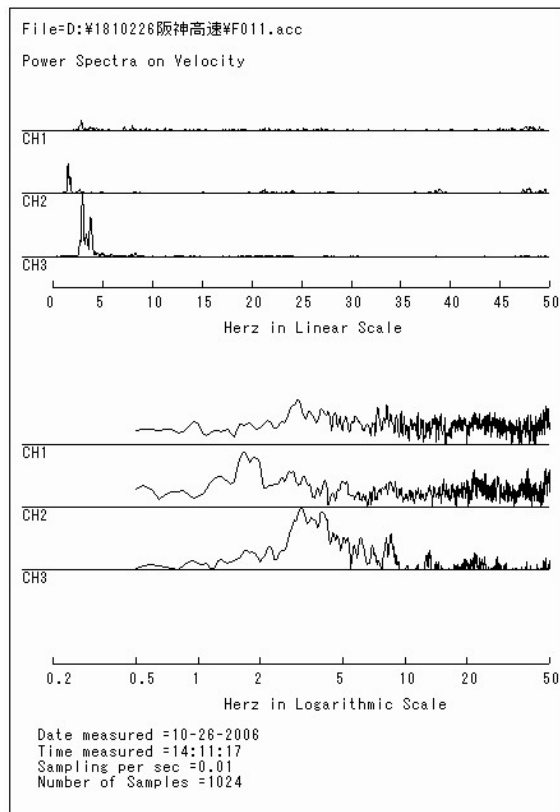
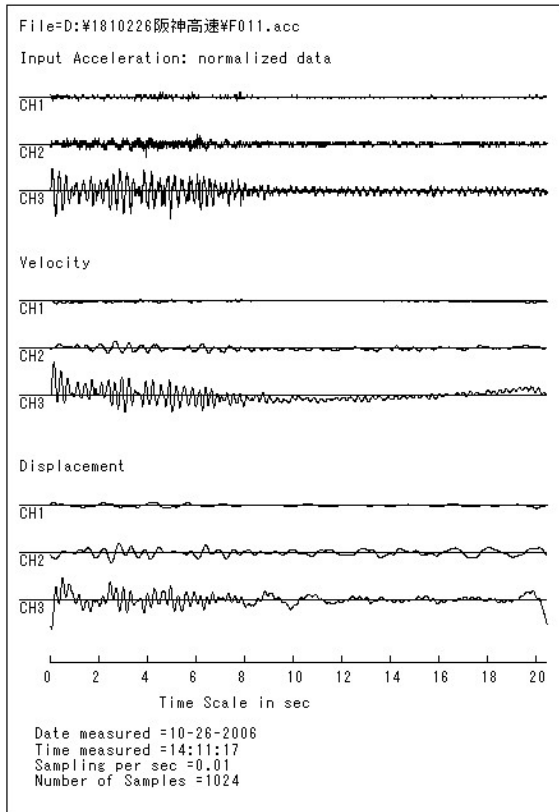
測定ファイル F009 (** 2)



測定ファイル F010 (** 3)



測定ファイル F011 (** 2)



////