

隅田川橋梁群の簡易振動計測 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 (瀧上工業株式会社)
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 | 2 |
| 3. 計測作業とモニタリング | 4 |
| 4. 解析結果説明と所見 | 6 |
| 付録A: バイプログラムとランニングスペクトル | 10 |
| 付録B: 加速度・速度・変位のグラフとスペクトルのグラフ | 17 |

1. 概要

橋梁をはじめ、構造物の健全度を診断する一つの方法として、振動の性質を分析して確かめる方法がある。古くから言われている「石橋を叩いて渡る」という諺はそれを指していて、丈夫そうに見える石橋でも、叩いて得られる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。この確認原理を、工学的な計測システムと解析システムに構築し、全体を診断システムとして提案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。この開発研究では、実際に架設されている橋梁の実測データを使い、その作業経験を取り込んで、診断システムの細かな仕様を詰める必要がある。同時に、測定の機会があればあるほど、経験的かつ統計的に知見が増えるので、これをデータベース化して利用することを計画している。

情報技術(IT)が急速に進歩してきたので、振動の計測から解析までのシステムは、外見的には非常に簡易化されてきている。個人の趣味でデータを収集することもできるので、取り立てて橋の管理者側や警察署などに許可を願い出るまでも無い程度で現場作業ができる。しかし、橋梁の振動測定は一般には未だ非常に専門的であって、国によっては写真撮影や、立ち入ること自体も制限を受けることがある。橋の上や周辺で「不審な行動をしている」と見咎められることを避けるため、事前に何らかの了解を得ておくのが無難である。実践的な振動測定のモデルにする対象に、東京都の隅田川橋梁群を選んだ理由は、筆者個人の趣味的な発想が出發である。考え方は、「比較的有名な橋であること・歩道があるので交通規制をしなくても作業ができること・交通量が多いので特別に荷重車などの手配は必要がないこと・瀧上工業株式会社本社が中央区八丁堀にあって作業基地として便利であること・中央区の範囲内にある隅田川の橋を測定する許可を得る事務的手続きに便利であること・過去に測定したデータと比較ができること」などの理由である。そこで、東京都の橋梁構造の専門官である高木千太郎氏に、個人的にお願いして了解を得て、平成18年(2006)9月21日に測定作業を実施した。

測定装置全体は、ショルダーバッグに納まる程度の小型であり、作業は歩道の上で行うので、一般車両の通行を妨げることもない。測定は、実質二人で作業する。振動の加振は、一般の車両通行で充分であるが、重量の大きい大型車が走行すると良いデータが得られる。測定箇所は、振動レベルが大きく得られる支間中央は必須であるとしても、現場に行き行って測定箇所の変更や追加を考えることにした。データは40秒程度の時間単位で数単位を記録する。隅田川を渡る橋は交通量が多いので、一橋当たりの測定時間は30分程度で済み、一つの橋から別の橋まで移動する時間を含めて、朝10時から午後3時まで、昼食時間も充分に取って、実質4時間で6橋の振動状況を測定した。このレポートは、このような簡易な作業であっても、有意義なデータが得られることの例を紹介する目的でまとめた。

(全23ページ)

2. 測定対象の橋梁と測定箇所

隅田川下流にある橋梁群のうち、特に有名な6橋（清洲橋・永代橋・中央大橋・相生橋・佃大橋・勝鬨橋）を測定対象とした。対象橋梁の写真を図1～図6に示す。支間構成（m）を付してある。測定作業箇所は、清洲橋・佃大橋・勝鬨橋は上流側の歩道上、他の3橋は下流側の歩道上であって、橋の長さ方向の位置は図7に示した。センサの設置場所は、原則として鋼主構に直接当たるようにしたが、一部では歩道床上である。



図1： 清洲橋(1928)自碇式チェーン吊橋
 $L = 45.72 + 91.44 + 45.72$



図2： 永代橋(1926)側径間つきタイドアーチ
 $L = 41.16 + 100.6 + 41.16$



図3： 中央大橋(1992)不等二径間斜張橋
 $L = 71.4 + 137.9$



図4： 相生橋(1988 架け替え)連続トラス
 $L = 41.25 + 66.00 + 41.25$



図5： 佃大橋(1964)鋼連続二箱桁橋
 $L = 86 + 90 + 86$



図6： 勝鬨橋(1940)跳開橋+タイドアーチ
 $L = 86(\text{アーチ}) + 45.6(\text{跳開桁}) + 86(\text{アーチ})$

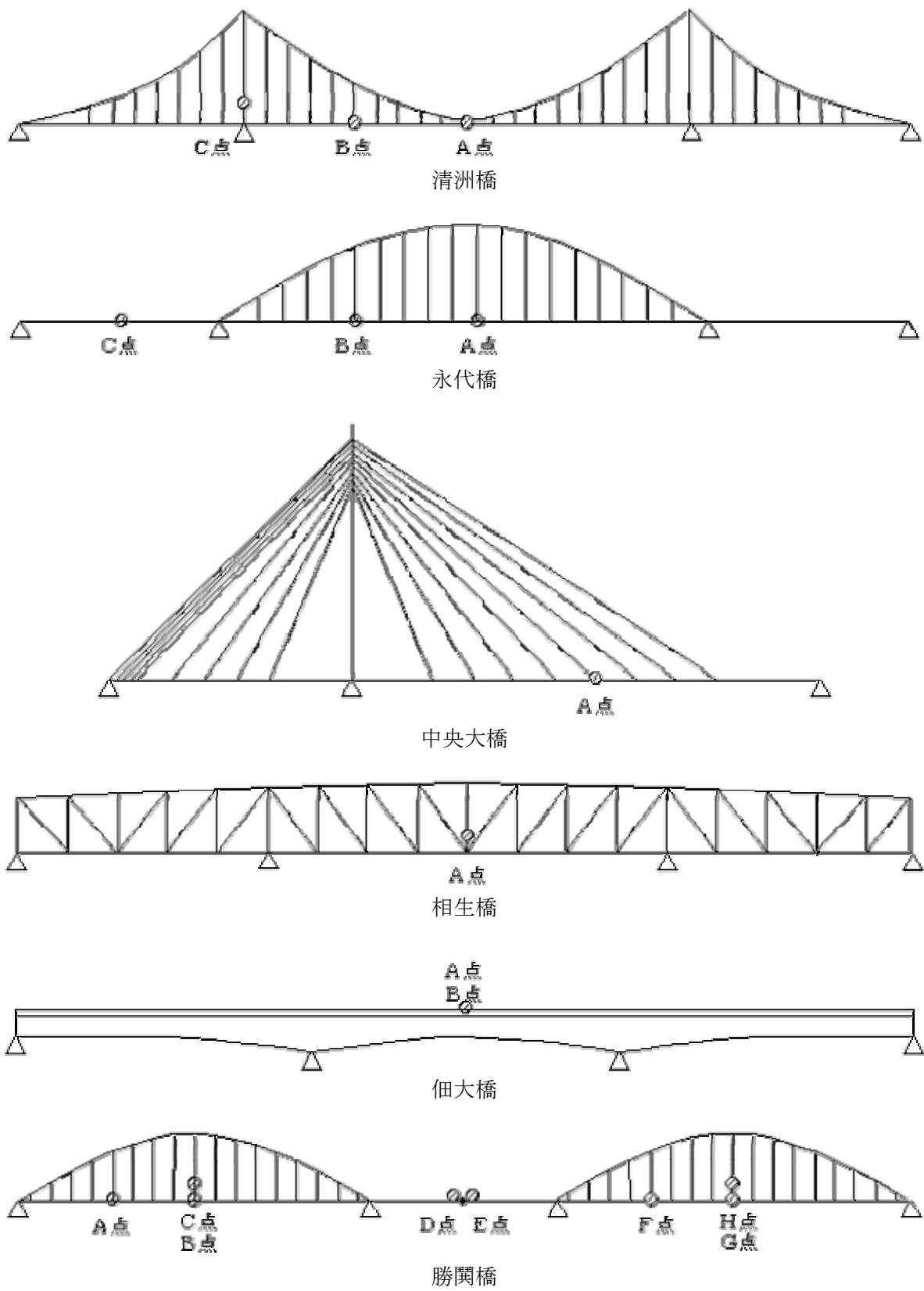


図 7： 隅田川橋梁の振動測定箇所図（下流側から見た位置、左が都心側）

3. 計測作業とモニタリング

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、ゴミ的なデータを捨わないように注意しなければならないので、センサ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。橋梁の場合、野外作業が常識であるので、計測環境の面での制約が大きい。その問題は二つある。第一は、センサ・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いことである。この制約は、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、センサの小型化では、歪みゲージ式の加速度計が有利である。トビ職などの協力が得られると、かなりの高所でも測定箇所に加えることができる。欠点として、クランプ機構を持たないので、輸送時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は向かない。歪みゲージを使うと応力変動の測定にも転用できる。発電型の速度計は、センサ自体が大きく、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、自動車が乗り入れできない環境では利用できない。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(図 8、図 9 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を研究課題とした。



図 8： 加速度計 (左) とレコーダ (右)
野外作業に向くような簡易化が重要



図 9： 測定作業の実際 (佃大橋歩道上)。
パソコンはモニタ。無くても作業はできる。

振動計測は、三成分一体型の加速度計を使う方法を標準仕様とし、その出力を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 計測単位** は約 40 秒長さに区切ったファイルである。一方、解析単位は、1 計測単位から約 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 計測単位は、前後に 10 秒の余裕時間を加えたものに設計した。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効率的になる。この計測単位で、どの箇所、何回測定すればよいかは現場の状況によるが、4～5回の計測をするのを標準とした。通行車両の疎密とも関係するが、一箇所でも 10 分程度の時間を見込む。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。

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は無い。したがって、研究者は、市販のプログラミング言語を使い、自前でプログラムを開発することが常識であった。この構図は、診断システムの大衆化には不向きであるので、標準的に利用できる解析プログラムを幾つか開発した。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。解析上の特殊な要求に弾力的に対応するには、VB6 は扱いやすいプログラミング言語である。上記のプログラムは、隅田川橋梁群のデータ解析作業に利用しながら、バグの除去や、ソースコードの変更などを頻繁に行ったので、簡易測定を標榜しながら、測定日からこのレポートをまとめるまでに約6ヶ月もかかってしまった。目標としては、計測直後に速報的に解析結果が得られ、それを見てデータの取り直しなどの判断ができることにある。

プログラム“DataPreviewer”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。現場測定の節目で、測定した直後の生データを解析して見ることも可能ではあるが、パソコン操作が煩雑になるので、あまり勧められない。解析作業は、レコーダの CF カードに記録されたデータを、パソコン側のフォルダにデータを移しかえて処理に載せる。解析に用いるパソコンは、現場に持ち込むパソコンと同じである必要はないので、CF カードをレコーダから取り出して、解析用パソコンに繋ぎ、データ管理用フォルダなどに編集する。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、原始データとして管理する。従来の振動測定は、眼に見えるオシログラムを原始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。付録Aに、全測定単位からの抜粋をハードコピーして例示した。

プログラム“DataPreviewer”で表示されるバイプログラムとランニングスペクトルを見れば、生の振動現象の概略が読取れる。測定した総ての生データが解析に向くとは限らないので、解析に適する区間を選んで標準化した解析作業用ファイルに切り出す。このファイルは、元のバイナリー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を追加記録する。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。加速度・速度・変位のグラフとスペクトルのグラフは、付録Bとしてこのレポートの後半にハードコピーに編集して添付した。

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ち、いわゆるランダムな波形である。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

振動データの解析結果から対象構造物の力学的性質や健全度を判定するときは、計算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する。今回の測定結果は、再度測定する機会のときに参考にすると共に、今後、同じような構造物の測定結果を得たときに参考にするデータとして、積み上げたい。以下に解析結果の要点と、それから得られる個人的な所見を、幾つかの項に分けて記した。

- 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、付属資料として、全データではなく、抜粋を添付した。したがって、測定番号で F***または S***で示す番号***は連続していない。
- 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、解析作業用ファイルではデータ数を間引いて 0.01 秒刻み、20 秒区間、サンプル数 2048 で標準化してある。したがって、スペクトル解析の周波数尺度は、付録 A のランニングスペクトルでは 100Hz まで、付録 B のパワースペクトルでは 50Hz までになっている。
- パワースペクトル図の工学的な原義は、或る時間範囲のエネルギー（パワー）の周波数別の分布図である。構造物の振動解析に応用する場合には、スペクトル計算は速度波形を使うのが工学的に正しい。しかし、ランニングスペクトルは、便宜上、加速度データからパワースペクトルの計算をして図化してある。付録 B では、速度データに積分した値からパワースペクトルを計算し、判断の助けになるように、同じデータから線形尺度と対数尺度とを上下に並べて表示した。
- 電気・機械装置の振動は、定常的な性質を示すことが多い。定常的とは、観察時間区間のどこを選んでも、ほぼ似たような性質があることを言う。構造物の振動は、時間的に刻々と変動する性質が大きい。卓越振動数は、時間的にも場所的にも出たり出なかつたりし、振動数自体にも僅かな揺れが観察される。これは、周期的な性質に対する確率的な性質である。しかし、ランニングスペクトルで見ると、卓越振動数の位置が縦に揃って観察されるので、単発的なゴミデータと明瞭に区別することができる。また、三成分ごとに固有の卓越振動の強さが異なって現われるので、振動モードを同定するときの参考にできる。
- 橋梁の振動は外的な攪乱力に引きずられる応答振動の性格を持ち、通行する車両がその攪乱力を引き起こす。この攪乱力には確率的な性質があるため、同じ測定箇所であっても、数回の測定をすると計算上の卓越振動数に揺れが観察される。今回の簡易測定では、一箇所での複数単位の測定の内、1 単位だけを解析に載せた。
- 構造物の振動モードを同定する目的を持つ場合は、複数箇所での時間的な同期を取った測定が必要であって、作業全体が複雑化する。一箇所だけで観測すると、振動モードの節（フシ）に当たる箇所では振動レベルが低く、測定に掛からないことがある。吊橋およびアーチ系の橋梁では、支間中央に節のある逆対称モードの振動が卓越する性質があるので、支間中央点と支間の 1/4 点とを測定箇所を選ぶことで振動モードを間接的に推定した。
- ランニングスペクトルを見ると、卓越振動が時間的に出たり出なかつたりすることが分かるので、解析作業用ファイルは、同じ 40 秒長さの生データから切り出し区間を変えて解析に掛ける場合がある。
- 概略の卓越振動数の拾い出しリストは、二つのプログラム“DataPreviewer”と“DataIntegral”で得られる。その単純な要約を表 1 に示す。周波数刻み（周波数分解能）が約 0.05Hz であるので、有効数字は小数点以下 1 桁に丸めた。幾つかの極値が計算されるが、ど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。

表 1： 単純な卓越振動数の拾い出しリストから(Hz)

| 橋梁名(測点) | 測定番号 | 橋軸方向 | 橋軸直角方向 | 鉛直方向 |
|---------|------|----------|----------|-----------------|
| 清洲橋(B) | S007 | 40.6 | 7.8/12.3 | 1.1/1.8/2.9 |
| 清洲橋(A) | S015 | 3.3/20.3 | 20.3 | 1.2/3.3/7.8 |
| 永代橋(A) | F021 | 10.7/43 | 3.3/7.0 | 1.5/2.6/3.7 |
| 永代橋(B) | F024 | 10.6 | 7.4/10.5 | 2.2/3.1/3.7 |
| 中央大橋(A) | F030 | 17.8 | 17.8 | 1.9/3.1//9.9 |
| 中央大橋(A) | F033 | 17.4 | 12/15 | 3.1/5.1/9.9 |
| 相生橋(A) | F037 | 25.2 | 17.8 | 2.5 |
| 佃大橋(A) | F040 | 3.5 | 3.2 | 2.1/3.5 |
| 勝鬨橋(A) | F041 | 3.7 | 2.9/3.2 | 1.8/3.7 |
| 勝鬨橋(B) | F052 | 9.7 | - | 2.5/3.7/4.0/8.2 |
| 勝鬨橋(D) | F061 | - | 8.6/11.1 | 3.3/8.6/11.1 |
| 勝鬨橋(F) | F063 | 9.8 | 8.8 | 1.8/3.9 |
| 勝鬨橋(G) | F065 | 13.5 | 9.8/10.9 | 2.5/3.6/10.9 |

- 橋梁本体の応答振動の理論的なスペクトルグラフは確率分布の性質があつて、これを両対数グラフに描くと、幾つかの卓越振動の箇所を山を描き、その山の緩急が減衰係数の大小を表す。通行する車両がランダムな攪乱力になると、山の形が崩れ、スペクトル強さの極大値の位置が揺れる。これを、近接して幾つかの卓越振動数があると間違え易い。そこで、付録A、付録Bに図化した3種類のスペクトルグラフから、橋梁全体としての固有振動数を推定したのが表2である。なお、減衰係数の同定は、このレポートでは扱っていない。

表 2： 固有振動数の推定

| 橋名 | 振動数(Hz) | 参考値 | 説明 |
|-------------------|----------|-----|--------------------------------|
| 清洲橋 | 1.2 | 1.7 | 中央径間中央(B)で観測される対称1次の振動 |
| | 1.8 | | かすかに観測されるが、同定は無理と判定 |
| | 2.9 | | 1/4点(A)で観測される逆対称モード。 |
| | 3.3 | | 上記2.9Hzと近接しているため、同じモードの可能性はある。 |
| | 7.8 | | 橋軸直角方向にも成分を持つので、床組の曲げと推定。 |
| | 12.5 | | 逆対称モードの捩れ振動と推定 |
| | 20.3 | | 径間中央(B)での幅員方向の曲げ変形か？ |
| 永代橋 | 40.6 | | 橋軸方向の振動で測定に掛かる鋼主桁を通る音 |
| | 1.5 | 1.6 | 対称1次モードと推定した。 |
| | 2.2 | | 逆対称モードと推定した。 |
| | 3.7 | | 対称2次モードと推定した。 |
| 中央大橋 | 7.4/10.5 | | 橋軸直角方向にも成分を持つので、幅員方向の床組の曲げ変形か？ |
| | 1.5~1.9 | 1.4 | 1次の卓越振動 |
| | 3.1 | | 斜橋の非対称曲線橋であるためモードの同定はできなかった。 |
| 相生橋 | 9.9~10.1 | | かなり顕著な上下動 |
| | 2.4 | 2.0 | 斜橋ではあるが連続トラスとしての曲げ1次振動 |
| 佃大橋 | 25/27 | | トラス弦材で測定したので、弦材の振動が大きく得られた |
| | 2.1 | 1.7 | やや斜橋の連続鋼桁であつて、1次の曲げ振動が卓越している |
| 勝鬨橋 銀座側 アーチ | 3.5 | | 捩れ変形の振動モードと推定 |
| | 1.8 | 1.7 | 対称1次モードと推定 |
| | 2.5 | | 逆対称モードと推定 |
| | 3.5 | | 対称2次モードと推定 |
| 同ヒンジ部 | 8~ | | 幅員方向の床組の曲げ？ |
| | 3.3 | 2.3 | カンチレバーとして振動。 |
| 同 月島側 アーチ | 11.1 | | 橋軸回りの捩れる変形と推定 |
| | 1.8 | 1.7 | 対称1次モードと推定 |
| | 2.4 | | 逆対称モードと推定 |
| | 3.9 | | 対称2次モードと推定 |
| | 9.8~ | | 幅員方向の床組の曲げ？ |

参考値はタワミ制限をL/1000と仮定したときの固有振動数の関係 $f=16/\sqrt{L}$ で計算した値(Hz)

- 橋梁の鉛直方向の卓越振動数 f (Hz)は、設計時の死荷重・活荷重を合わせた最大タワミに制限があるので、支間 L (m)との間に統計的な性質がある。タワミ制限が $1/1000$ の場合、 $f = 16/\sqrt{L}$ である。各橋梁の支間構成は図1～図6の説明に付記してあるので、これから計算された固有振動数の値を、表2に参考値として付した。戦前の橋梁（清洲橋、永代橋、勝鬨橋）の設計活荷重は現在よりも低いこともあって、この参考値に近い卓越振動数が得られた。勝鬨橋は同形式のタイドアーチが2橋あるので、その比較は興味がある。上下動の性質は殆ど同じ傾向を示すが、月島側のアーチ橋が僅かに振動数が高く得られた。勝鬨橋アーチが単連であるのに対して、清洲橋、永代橋は連続構造であるので、地盤・基礎などを含めた総合的な構造が影響して、やや低めの卓越振動になっていると推定した。戦後架設された橋梁（中央大橋、相生橋、佃大橋）は、何れも、固有振動数は参考計算値よりも高い。ただし、相生橋は佃大橋と比較すれば、やや剛性が劣る。
- 測定対象の隅田川の橋梁は何れも幅員が広いので、立体的に見て、水平面で橋軸直角方向に曲がる変形は考えられない。戦前の橋梁は幾何学的な対称性があるので、上下動と水平動とに、独立性がある。これが相関を持つ振動数は、捩れによる振動であると推定できる。戦後の橋梁（中央大橋、相生橋、佃大橋）は、斜橋や曲線橋であって、対称性に欠ける。特に中央大橋は非対称の斜張橋であるので、振動モードの推定には、今回の測定では資料不足である。
- 電子的な積分器を使えば、加速度計のアナログ出力を積分すれば速度データに変換できる理屈であるが、この積分器は非常に扱い難い装置であって実用に向かない。そのため、数値積分で、加速度記録から速度さらには変位を計算するプログラム“DataIntegral”を開発した。この場合においても、積分定数の設定を誤るとドリフトが増幅される。加速度から変位までを求める計算のアルゴリズムには、構造力学における梁の計算法をモデル化した。つまり、荷重を積分すれば剪断力に、さらに積分すれば曲げモーメントになる。時間軸を梁の長さ方向に取り、加速度を荷重に当てると、速度は剪断力に、変位は曲げモーメントにモデル化される。境界条件として、梁の両端において剪断力と曲げモーメントが0になればよい。この条件を満たすためには、測定作業において、加速度0で始まり、加速度0で終るように測定時間を区切る必要がある。このようにしても、数値計算上は、加速度データに付加的なドリフトを加えなければならない。このような調整を加えて、加速度・速度・変位の計算を行った結果のグラフを付録Bに示した。また、数値的な最大最小値を表3にまとめた。
- 数値積分を行う方法は幾つか考えられるが、元の加速度波形をフーリエ解析し、高周波成分の係数と低周波領域の係数を0にして再びフーリエ合成することで、数値計算術でバンドパスフィルタが実現できる。したがって、サーボ機構など、計測器側で回路を設計しなくても、あまり予備的な加工をしないで加速度データを記録する方が、弾力的にデータ処理に対応することができる。ただし、サンプリング周期で決まるナイキスト周波数以上をカットするフィルタは、センサのアンプ特性として必要である。

表 3： 加速度・速度・変位の最大最小値

| 橋梁名 | 測定番号 | 計算調整後の加速度 (単位 m/sec ²) | | | | | |
|-------|-------|------------------------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| | | 橋軸方向 | | 橋軸直角方向 | | 鉛直方向 | |
| | | Max | Min | Max | Min | Max | Min |
| 清洲橋 | S007 | 0.07 | -0.08 | 0.08 | -0.11 | 0.09 | -0.08 |
| | S015 | 0.03 | -0.02 | 0.04 | -0.04 | 0.04 | -0.04 |
| 永代橋 | F021 | 0.08 | -0.07 | 0.07 | -0.07 | 0.12 | -0.10 |
| | F024 | 0.02 | -0.02 | 0.03 | -0.03 | 0.05 | -0.03 |
| 中央大橋 | F0331 | 0.07 | -0.06 | 0.09 | -0.08 | 0.13 | -0.19 |
| | F0332 | 0.03 | -0.04 | 0.05 | -0.04 | 0.12 | -0.11 |
| 相生大橋 | F037 | 0.19 | -0.19 | 0.22 | -0.16 | 0.09 | -0.09 |
| 佃大橋 | F040 | 0.05 | -0.05 | 0.10 | -0.10 | 0.14 | -0.13 |
| 勝鬨橋 | F041 | 0.04 | -0.06 | 0.07 | -0.09 | 0.19 | -0.17 |
| 西アーチ | F052 | 0.17 | -0.18 | 0.22 | -0.30 | 0.12 | -0.10 |
| 同 ヒンジ | F061 | 0.74 | -0.68 | 0.69 | -1.05 | 0.86 | -1.02 |
| 同 | F063 | 0.09 | -0.12 | 0.09 | -0.11 | 0.12 | -0.11 |
| 東アーチ | F065 | 0.07 | -0.06 | 0.06 | -0.05 | 0.05 | -0.06 |

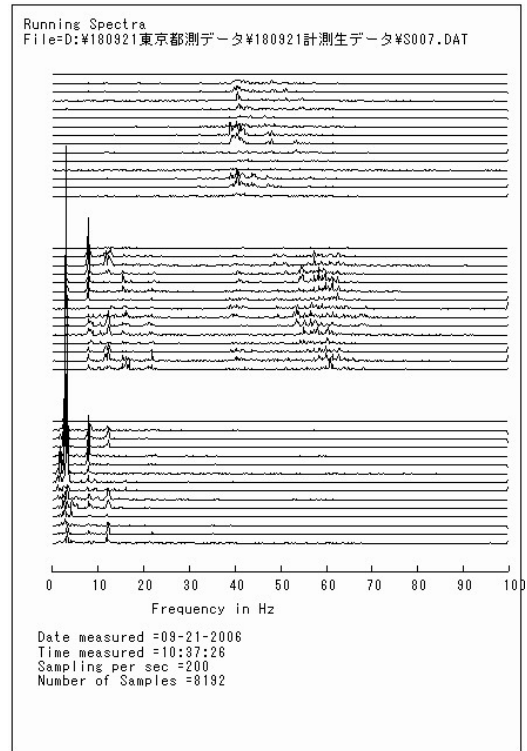
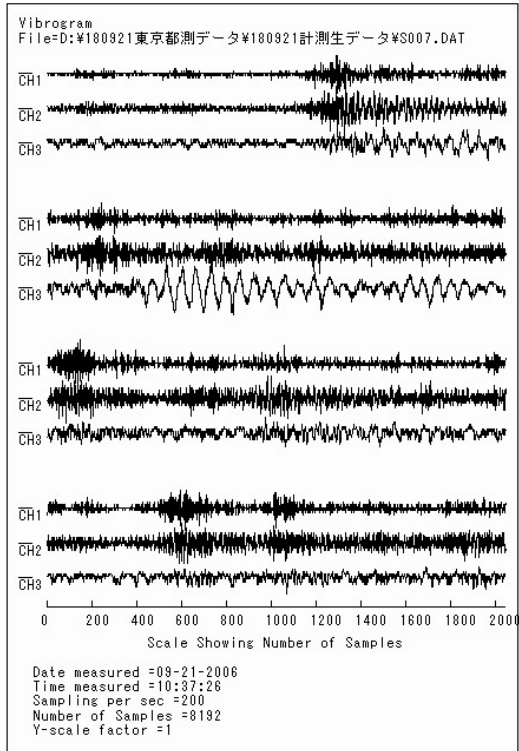
| 橋梁名 | 測定番号 | 速度 (単位 cm/sec) | | | | | |
|-------|-------|----------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| | | Ch1 (橋軸方向) | | Ch2 (橋軸直角方向) | | Ch3 (鉛直方向) | |
| | | Max | Min | Max | Min | Max | Min |
| 清洲橋 | S007 | 0.06 | -0.05 | 0.10 | -0.12 | 0.35 | -0.37 |
| | S015 | 0.05 | -0.05 | 0.05 | -0.06 | 0.20 | -0.19 |
| 永代橋 | F021 | 0.08 | -0.06 | 0.10 | -0.11 | 0.37 | -0.45 |
| | F024 | 0.04 | -0.05 | 0.07 | -0.06 | 0.23 | -0.19 |
| 中央大橋 | F0331 | 0.07 | -0.08 | 0.11 | -0.09 | 0.40 | -0.34 |
| | F0332 | 0.04 | -0.05 | 0.06 | -0.09 | 0.26 | -0.24 |
| 相生大橋 | F037 | 0.18 | -0.15 | 0.14 | -0.18 | 0.26 | -0.29 |
| 佃大橋 | F040 | 0.11 | -0.11 | 0.50 | -0.46 | 0.57 | -0.65 |
| 勝鬨橋 | F041 | 0.12 | -0.14 | 0.24 | -0.26 | 0.74 | -1.09 |
| 西アーチ | F052 | 0.13 | -0.18 | 0.12 | -0.18 | 0.26 | -0.25 |
| 同 ヒンジ | F061 | 0.78 | -0.57 | 0.81 | -1.03 | 2.19 | -1.54 |
| 同 | F063 | 0.10 | -0.10 | 0.08 | -0.08 | 0.40 | -0.35 |
| 東アーチ | F065 | 0.11 | -0.10 | 0.08 | -0.08 | 0.18 | -0.14 |

| 橋梁名 | 測定番号 | 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 |
| 清洲橋 | S007 | 0.06 | -0.05 | 0.11 | -0.11 | 0.22 | -0.29 |
| | S015 | 0.07 | -0.09 | 0.07 | -0.07 | 0.24 | -0.20 |
| 永代橋 | F021 | 0.10 | -0.09 | 0.09 | -0.08 | 0.20 | -0.25 |
| | F024 | 0.08 | -0.08 | 0.09 | -0.09 | 0.14 | -0.19 |
| 中央大橋 | F0331 | 0.11 | -0.09 | 0.11 | -0.11 | 0.36 | -0.34 |
| | F0332 | 0.06 | -0.06 | 0.08 | -0.08 | 0.30 | -0.31 |
| 相生大橋 | F037 | 0.10 | -0.09 | 0.09 | -0.08 | 0.27 | -0.32 |
| 佃大橋 | F040 | 0.10 | -0.08 | 0.26 | -0.24 | 0.41 | -0.40 |
| 勝鬨橋 | F041 | 0.13 | -0.13 | 0.13 | -0.15 | 0.69 | -1.34 |
| 西アーチ | F052 | 0.45 | -0.31 | 0.08 | -0.10 | 0.14 | -0.16 |
| 同 ヒンジ | F061 | 0.44 | -0.47 | 0.57 | -0.38 | 1.09 | -1.14 |
| 同 | F063 | 0.12 | -0.13 | 0.10 | -0.09 | 0.23 | -0.23 |
| 東アーチ | F065 | 0.08 | -0.09 | 0.14 | -0.14 | 0.12 | -0.12 |

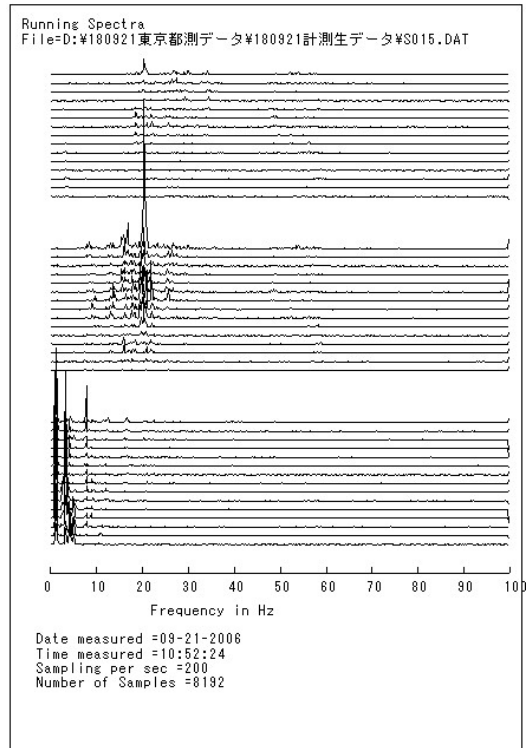
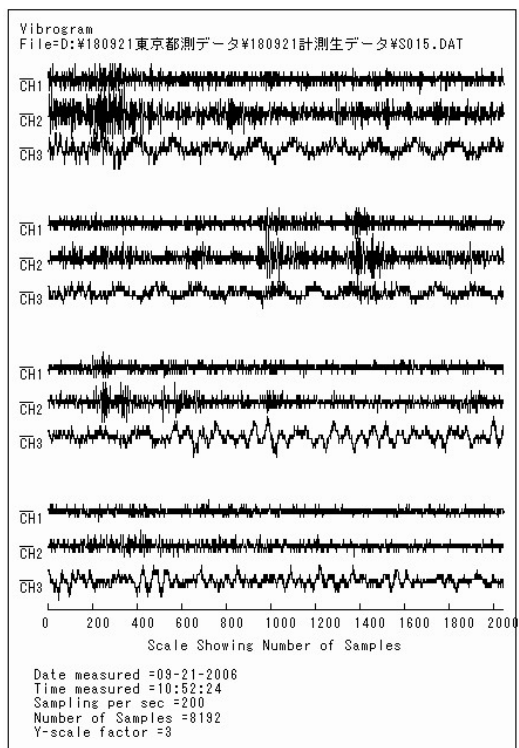
-----レポート本文終了。以降は付録である

付録A： バイログラムとランニングスペクトル
 (デフォルトは、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)

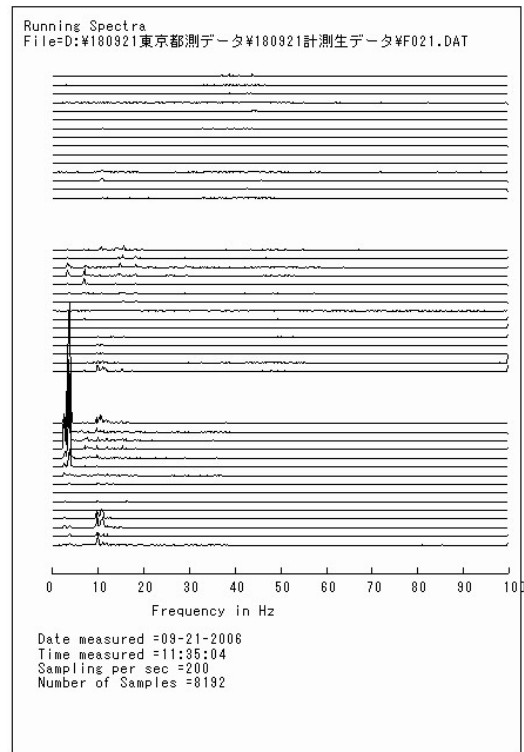
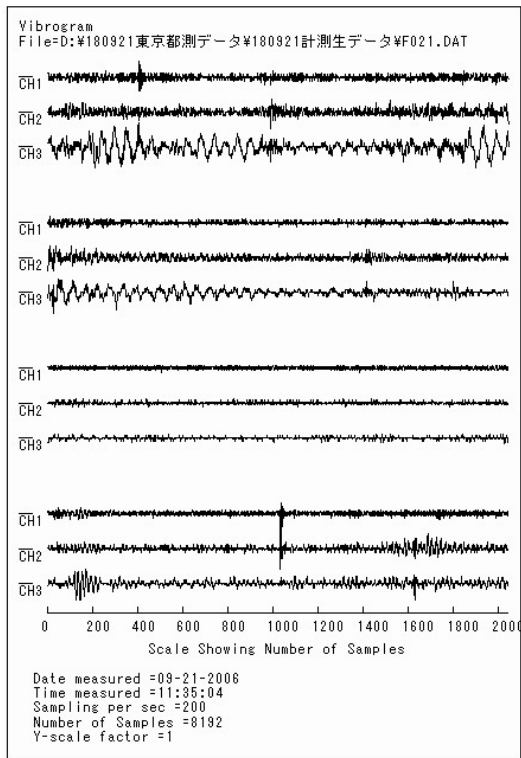
清洲橋中央径間 1/4 点 (東京寄り)



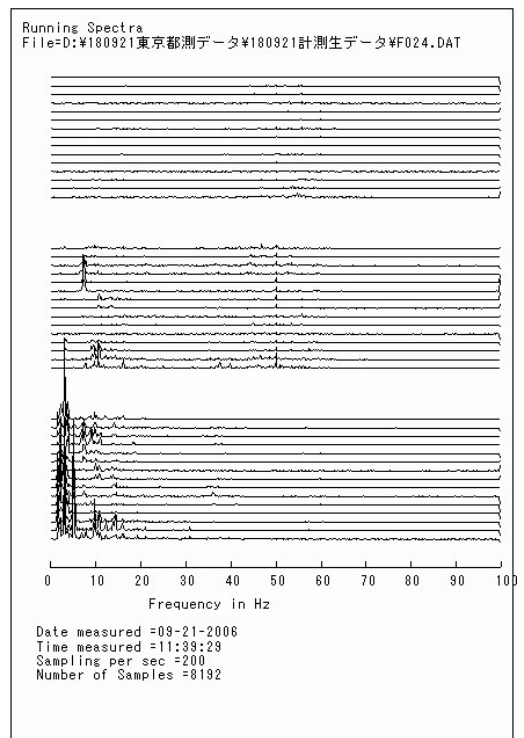
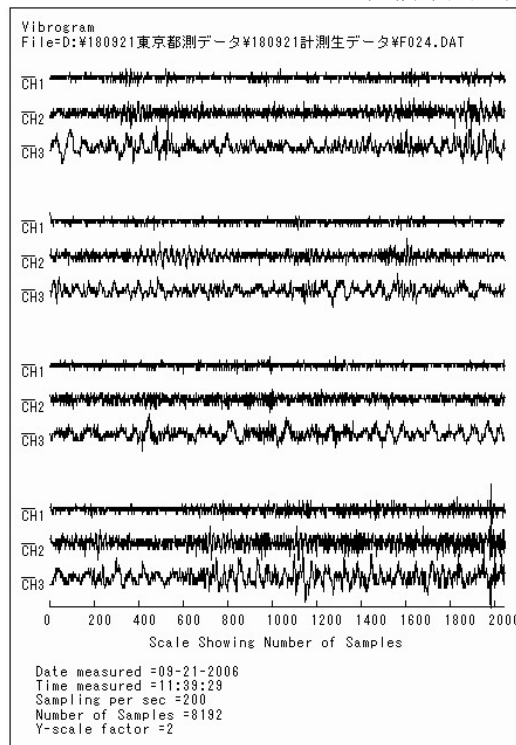
清洲橋中央径間中央点



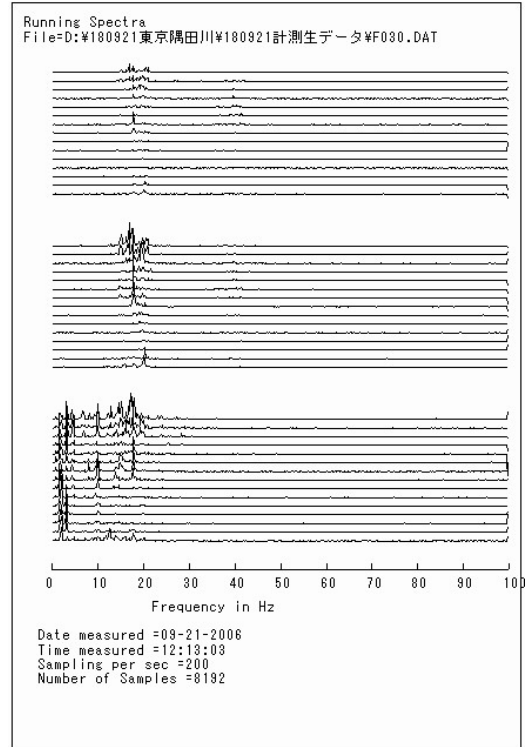
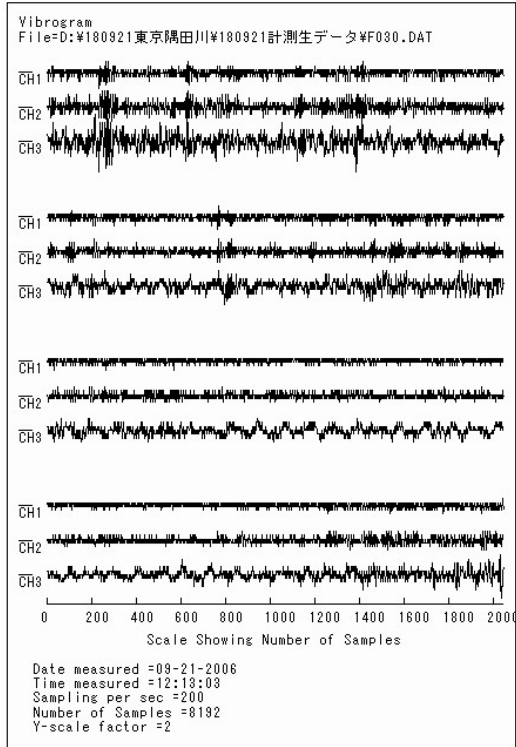
永代橋中央径間中央点



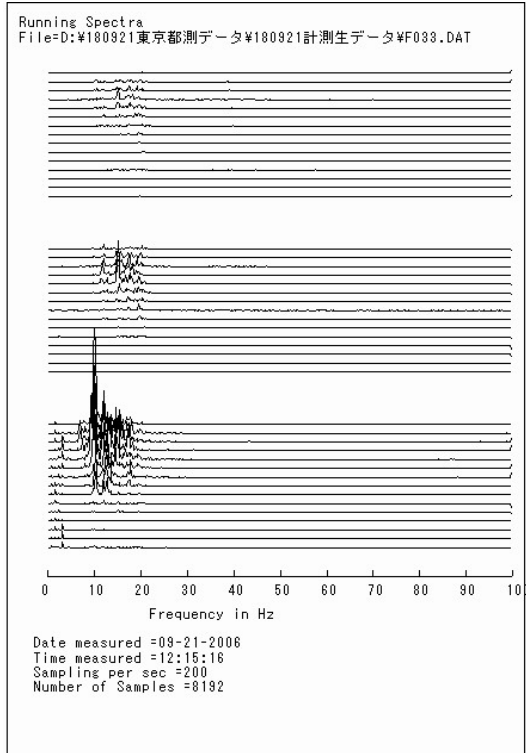
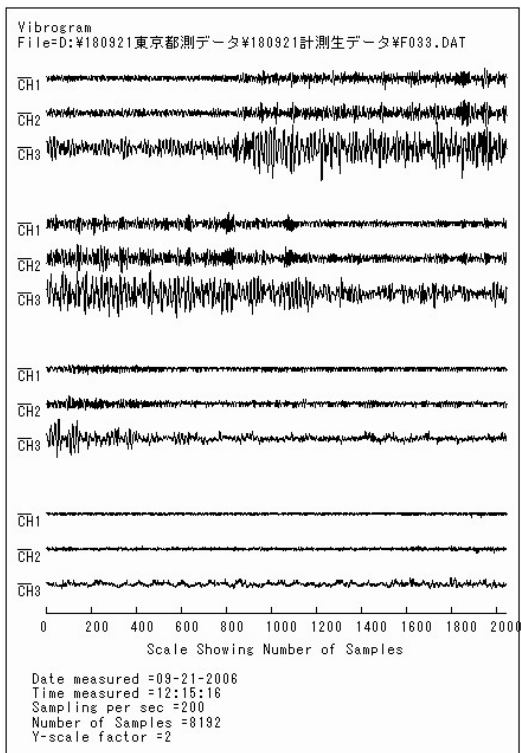
永代橋中央径間 1/4 点 (東京寄り)



中央大橋月島側径間中央点 (その1)

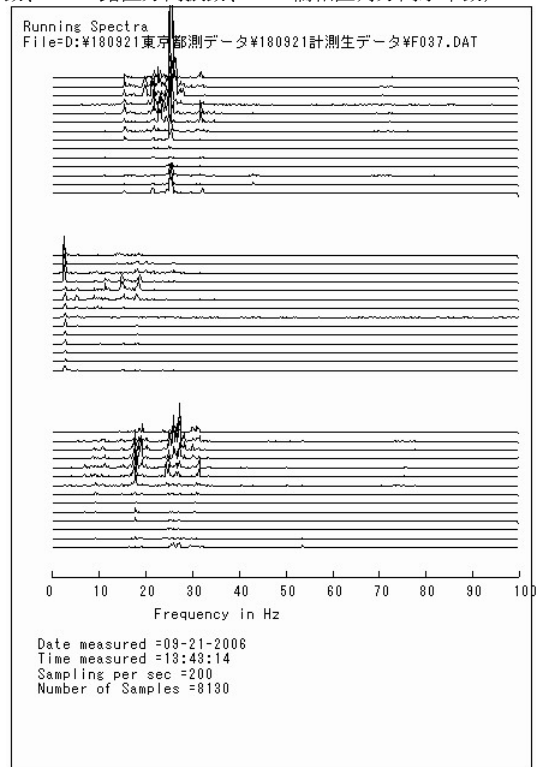
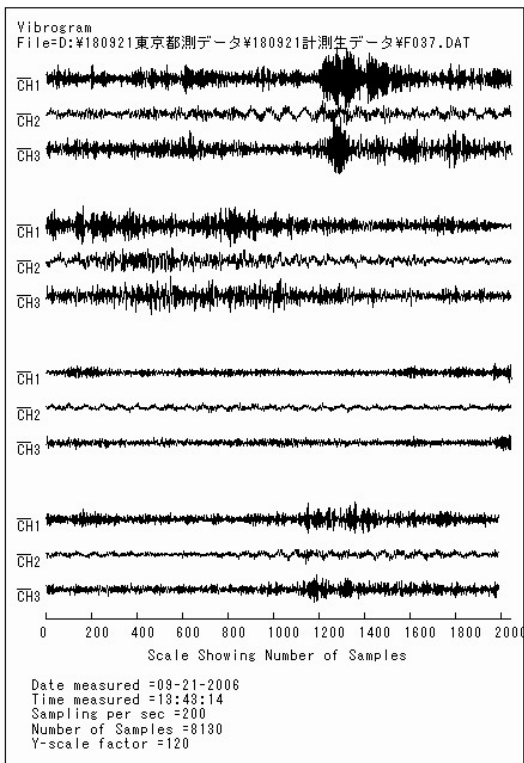


中央大橋月島側径間中央点 (その2)

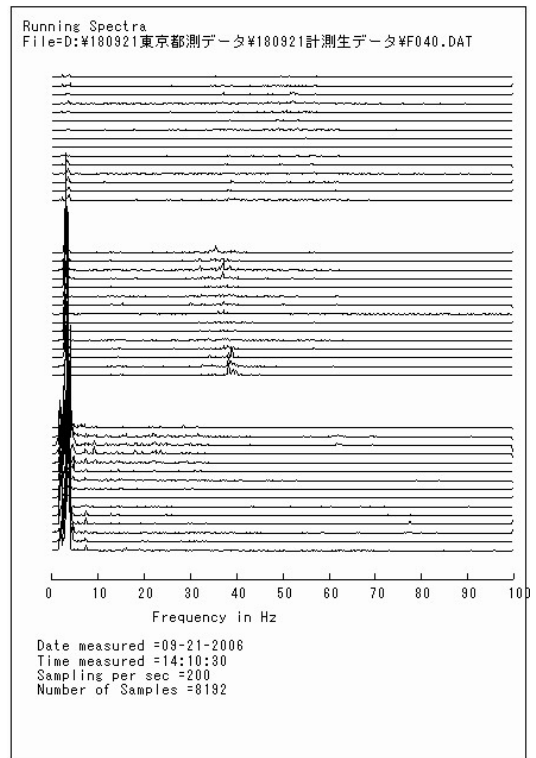
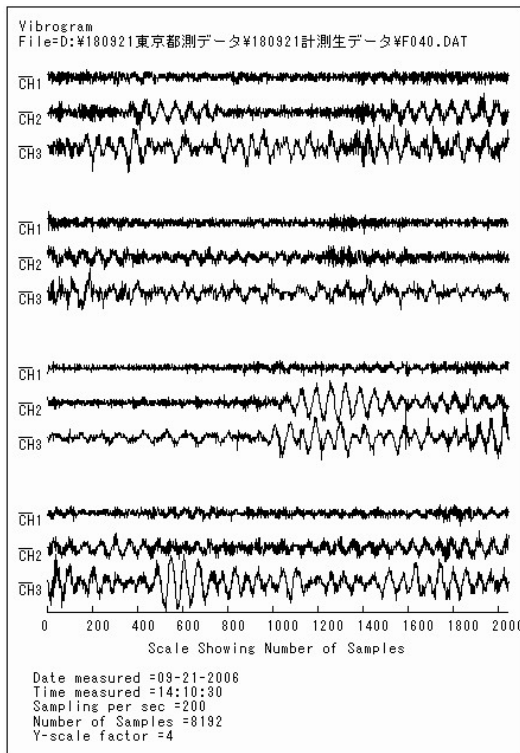


相生橋（連続プラットラス）中央径間の中央点

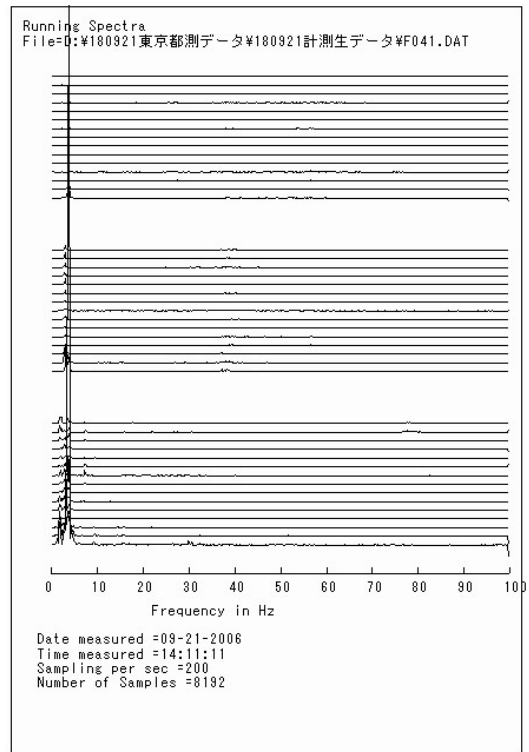
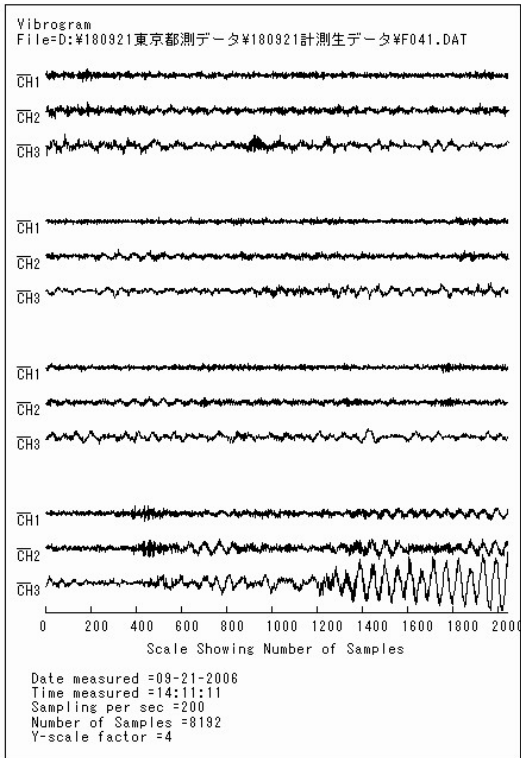
（ここでは、トラス弦材で測定したので、Ch1:橋軸方向水平動、Ch2:鉛直方向振動、Ch3:橋軸直角方向水平動）



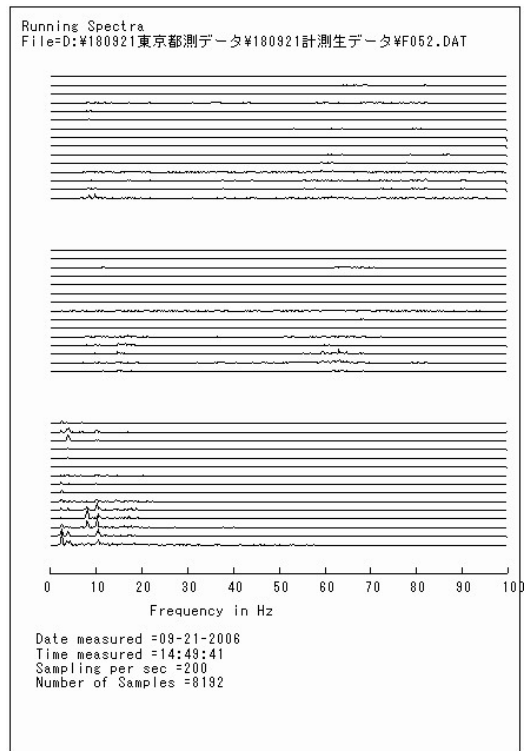
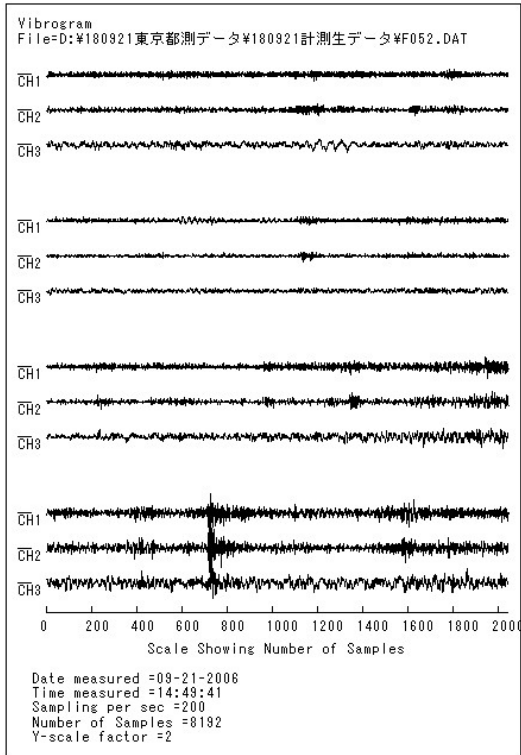
佃大橋中央径間の中央点



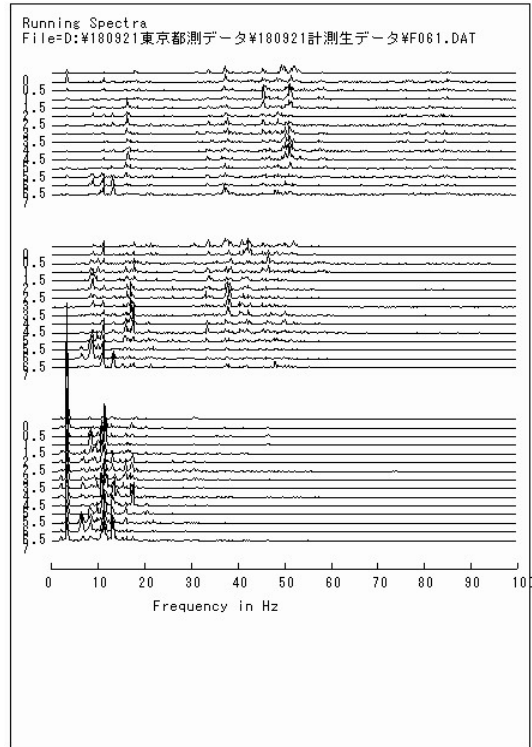
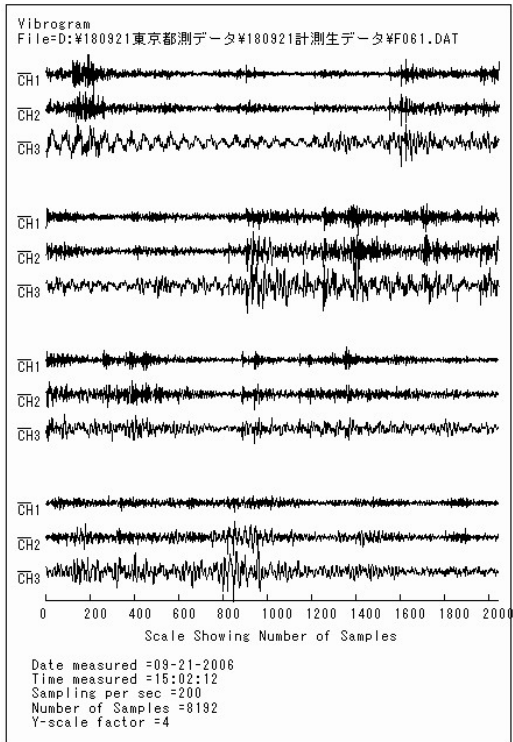
勝鬨橋東京寄りタイドアーチ 1/4 点



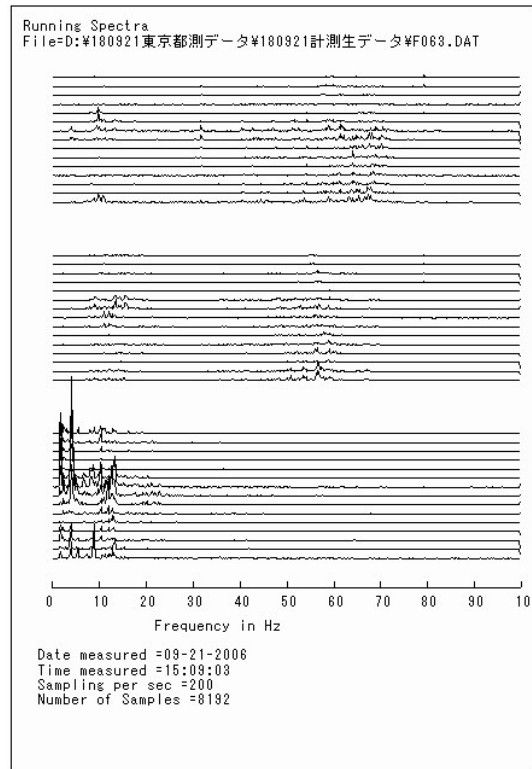
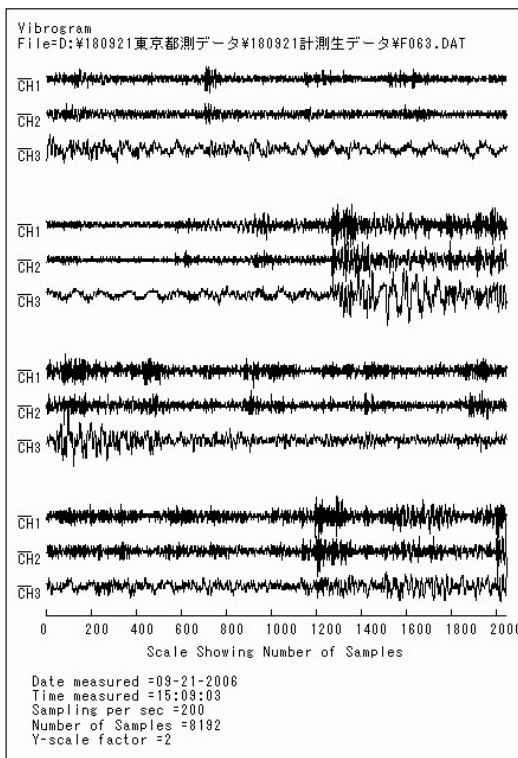
勝鬨橋東京寄りタイドアーチ支間中央



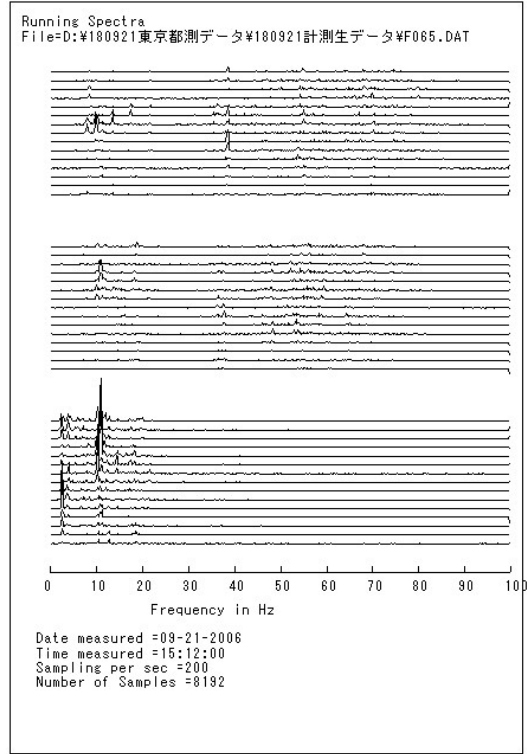
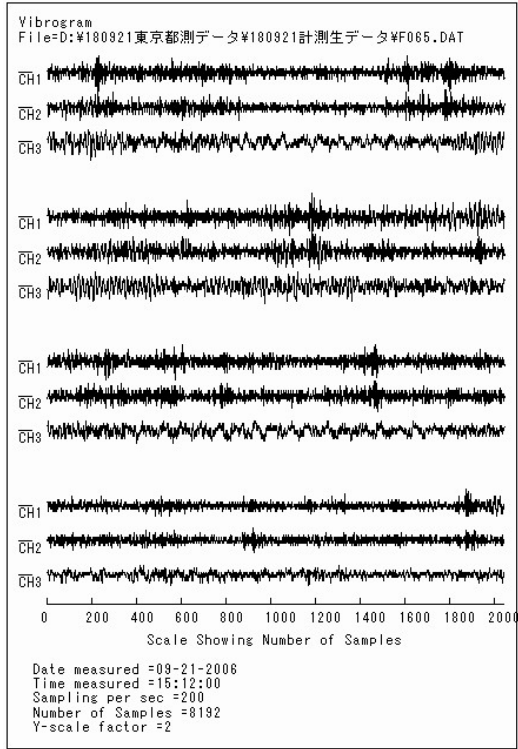
勝鬨橋中央径間 (跳開部) 中央ヒンジ部



勝鬨橋月島側タイドアーチ 1/4 点



勝関橋月島側タイドアーチ支間中央

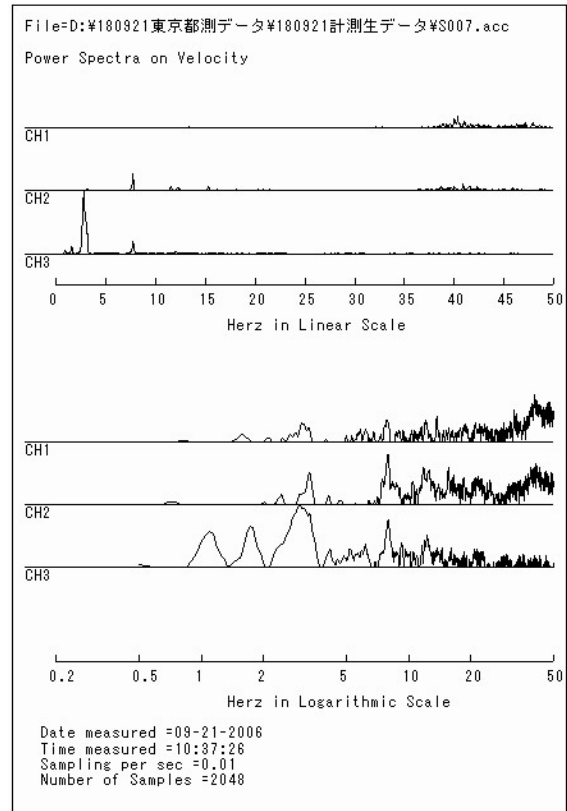
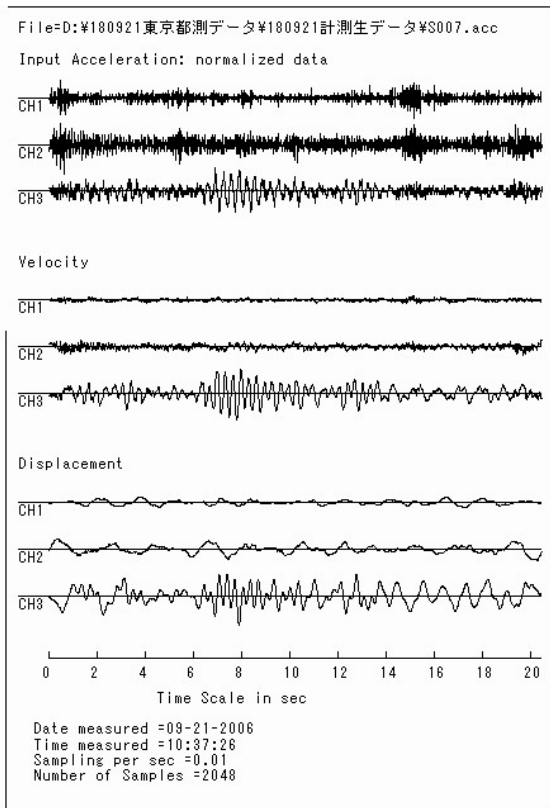


///

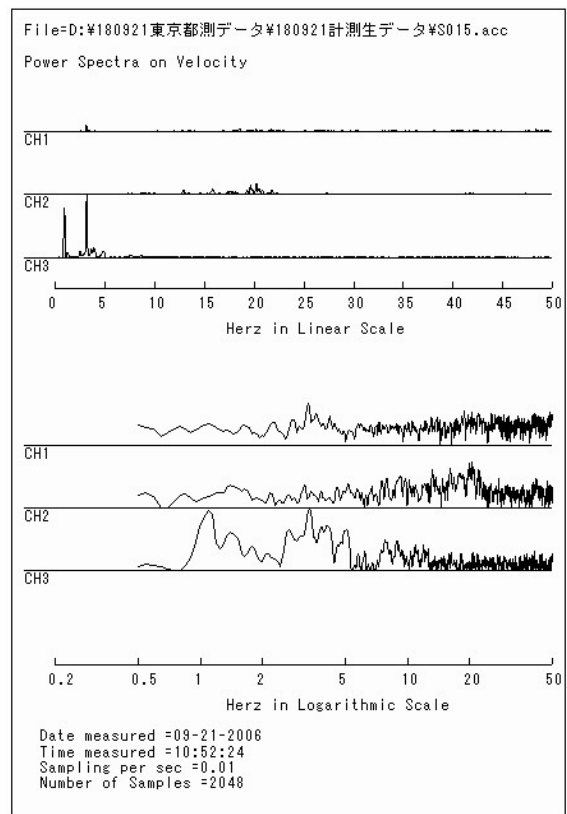
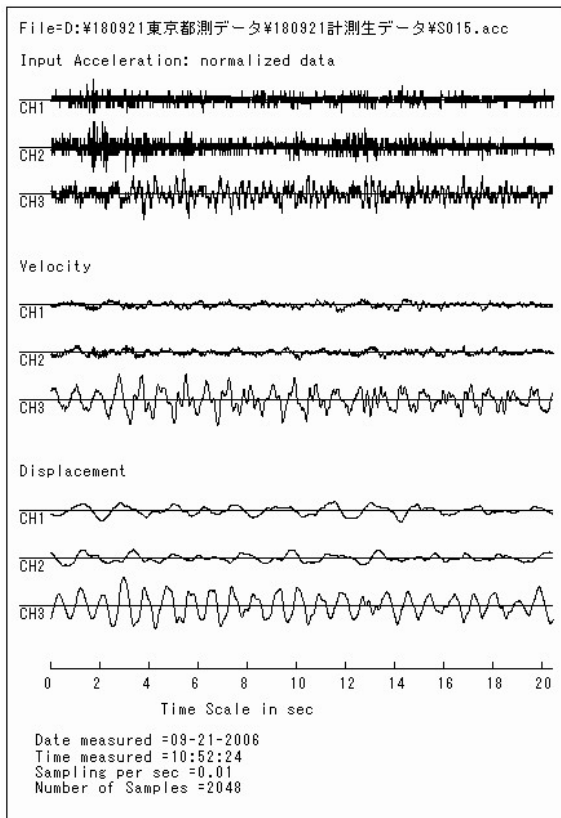
付録B：加速度・速度・変位の図 および 速度のパワースペクトルの図

(デフォルトは、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)

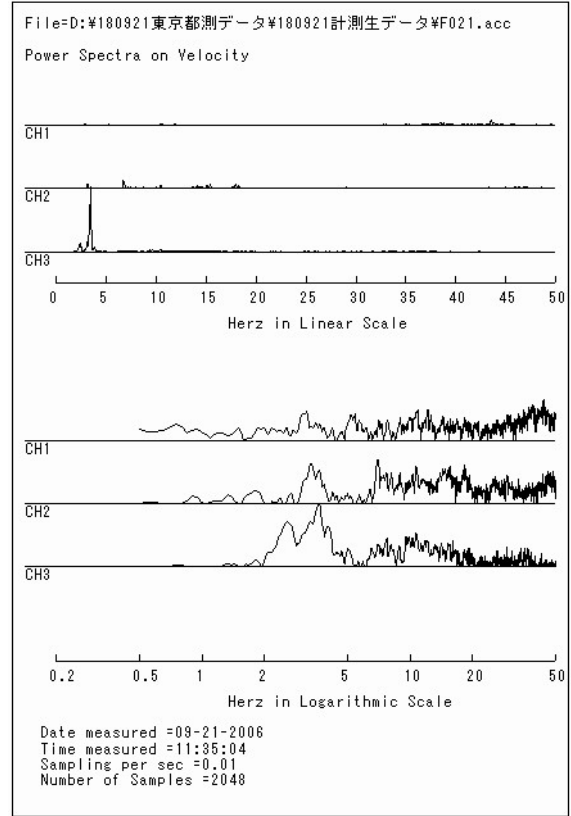
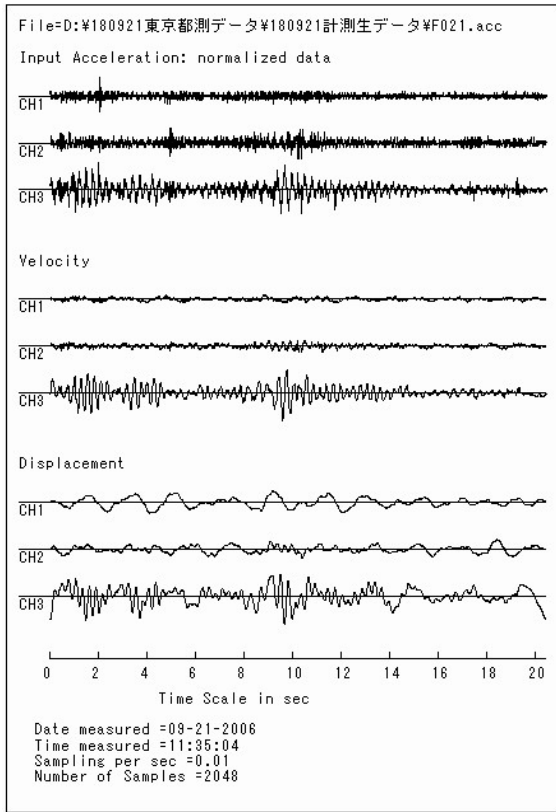
清洲橋 1/4 点



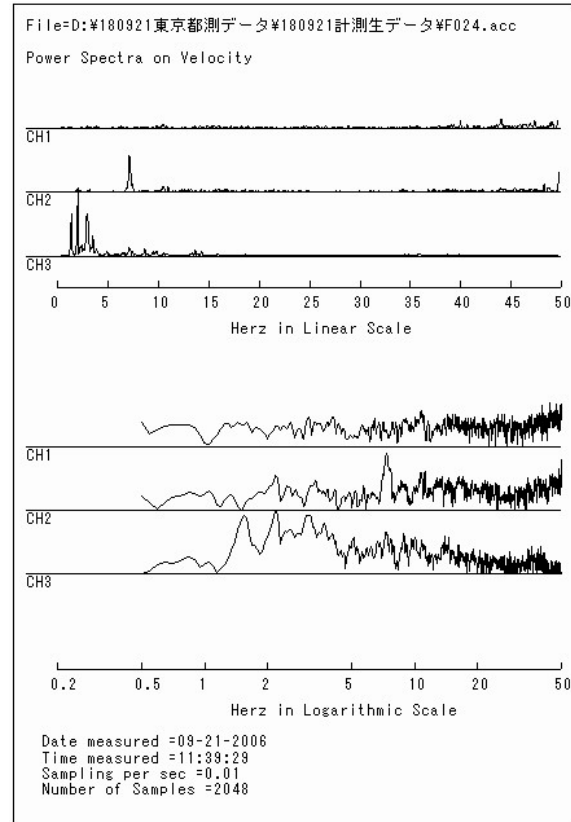
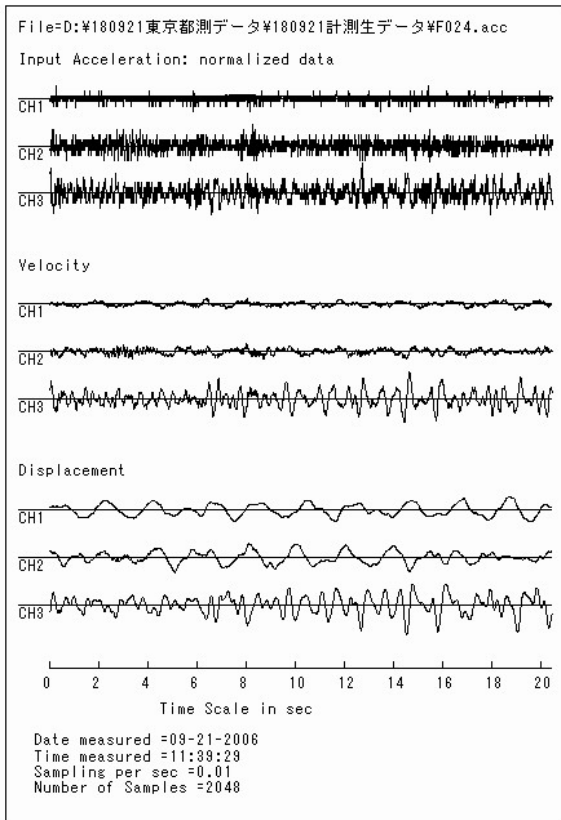
清洲橋中央径間中央



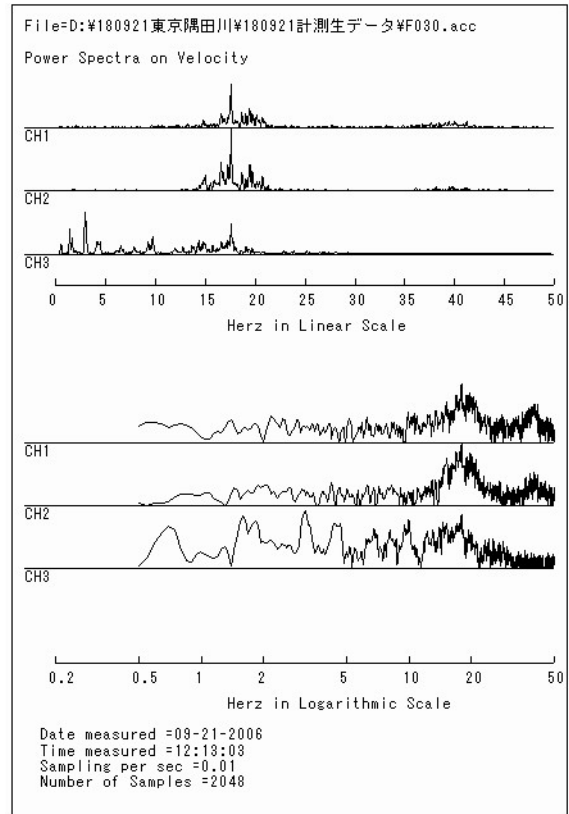
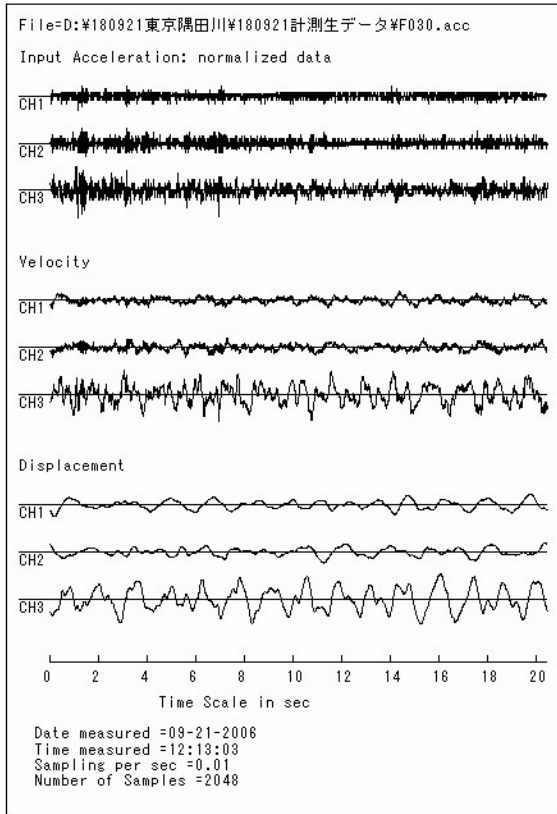
永代橋中央径間中央



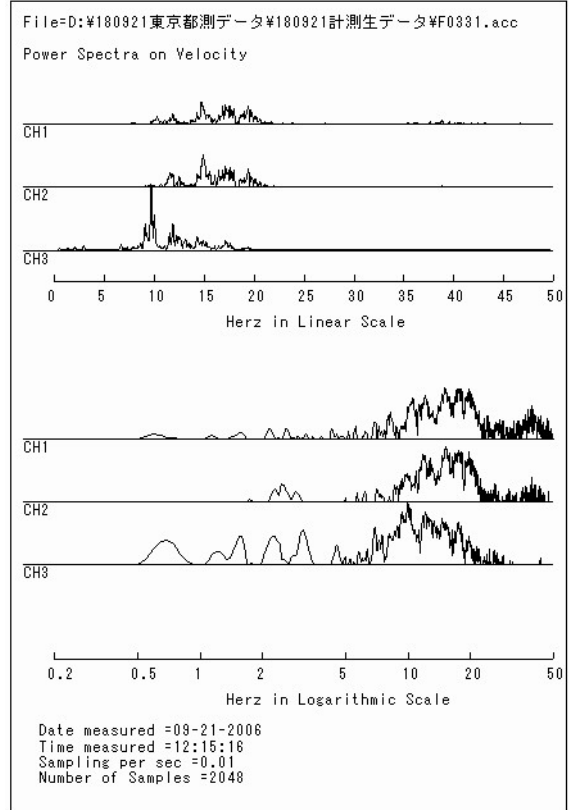
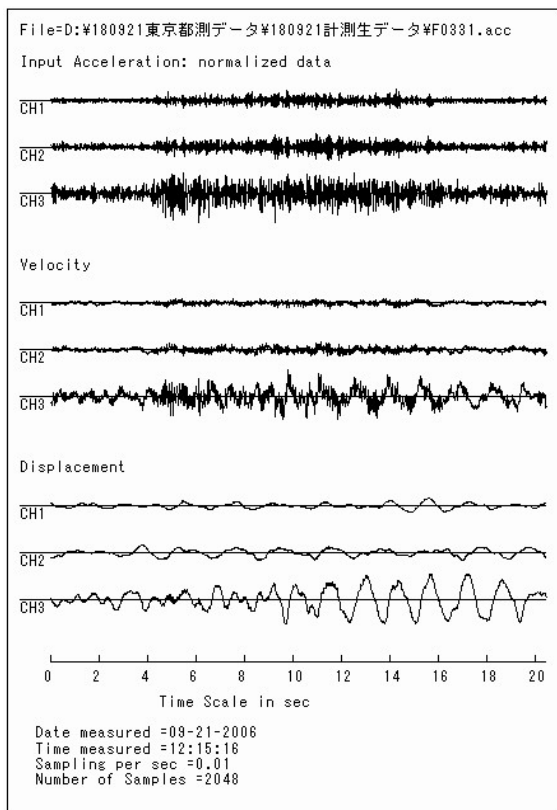
永代橋中央径間 1/4 点



中央大橋（中央径間中央）その1

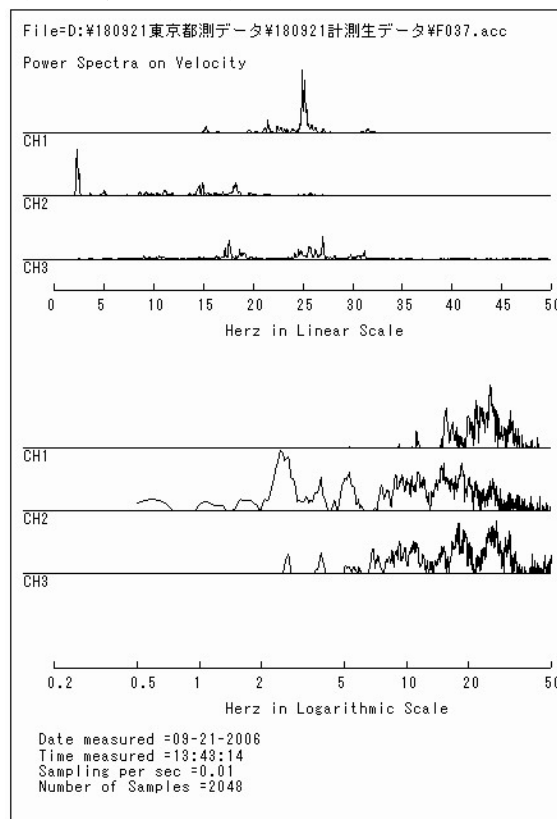
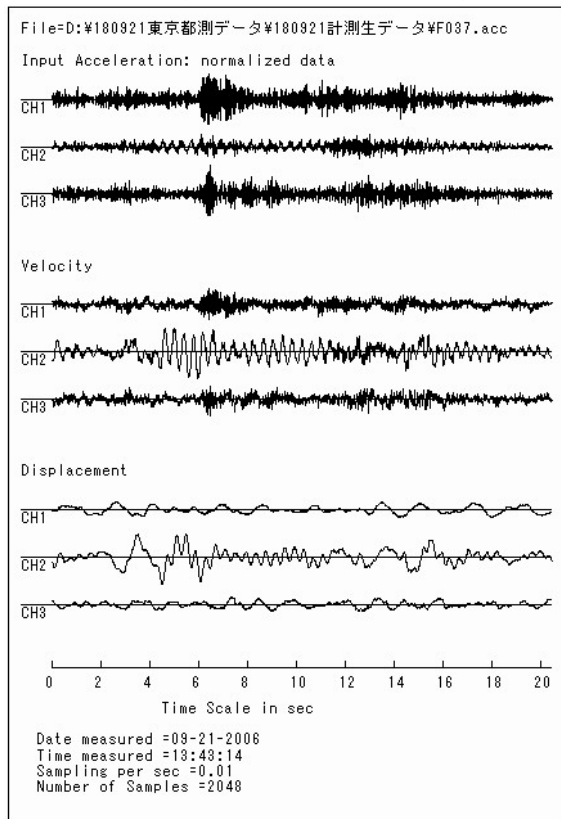


中央大橋（中央径間中央）その2

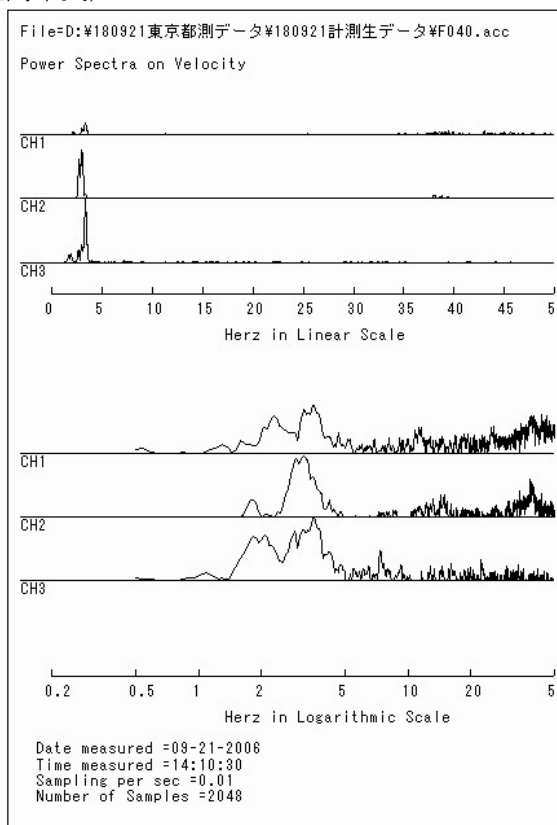
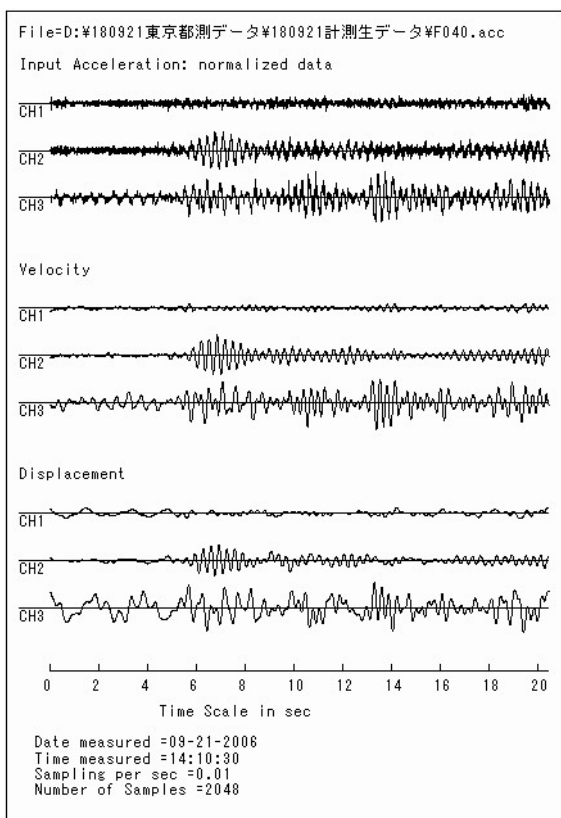


相生橋 (中央径間中央)

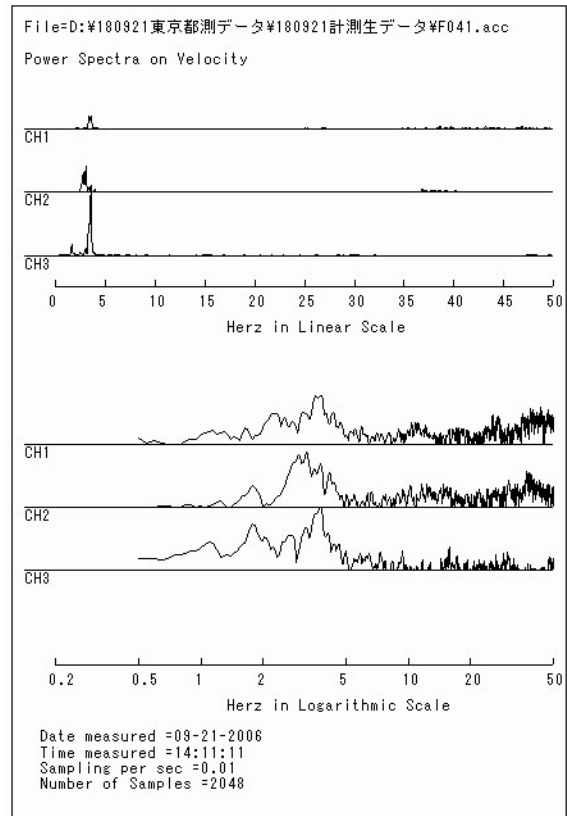
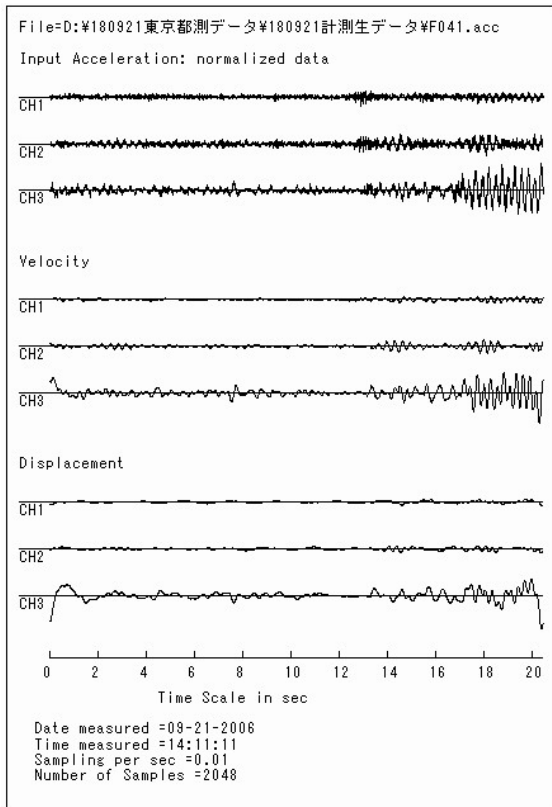
(ここでは、トラス弦材で測定したので、Ch1:橋軸方向水平動、Ch2:鉛直方向振動、Ch3:橋軸直角方向水平動)



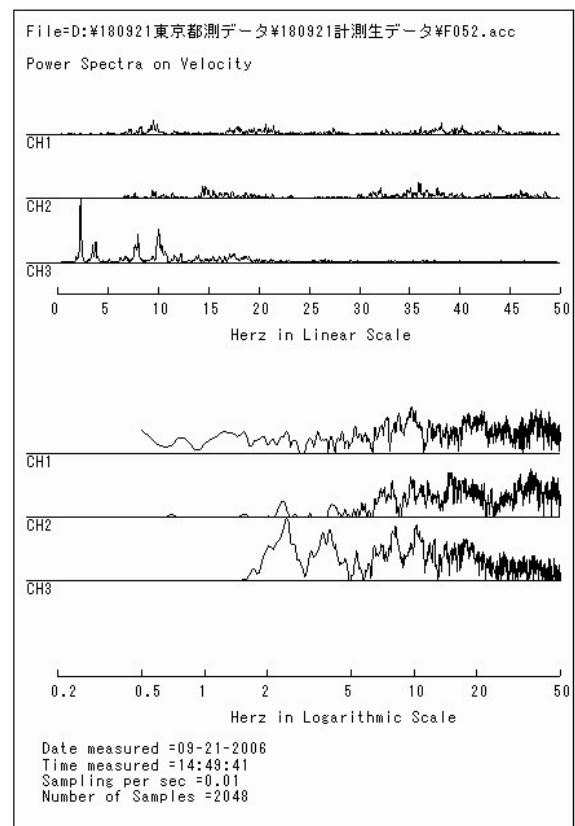
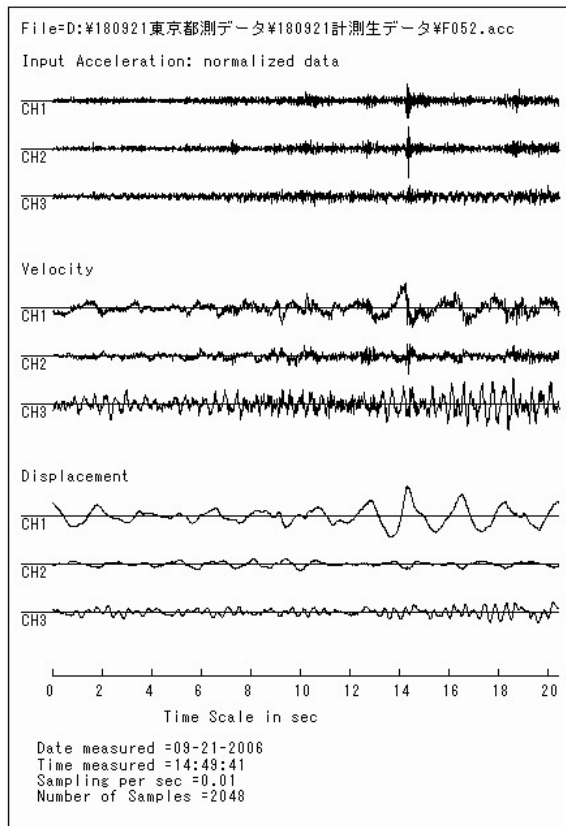
佃大橋 (中央径間中央)



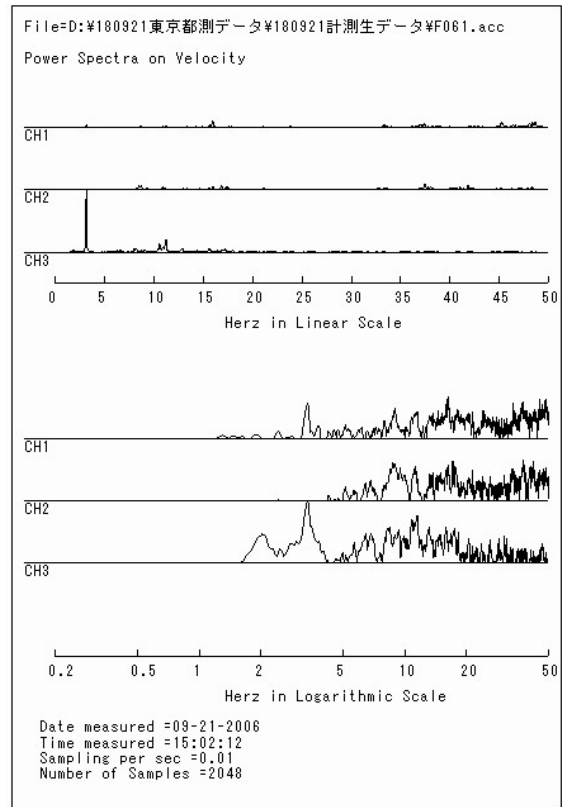
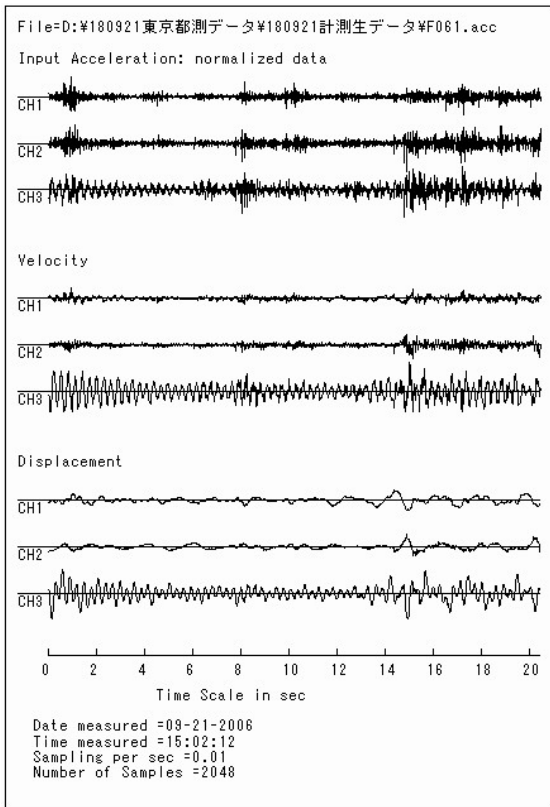
勝鬨橋アーチ (銀座側)



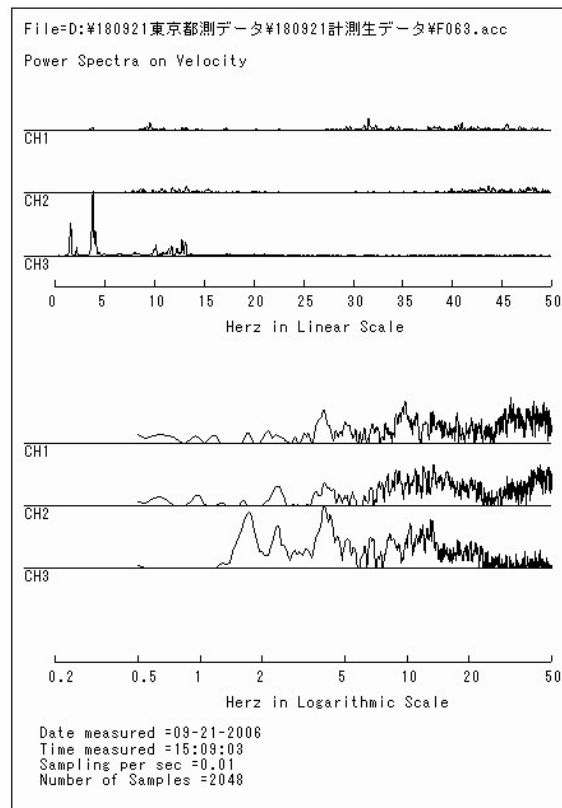
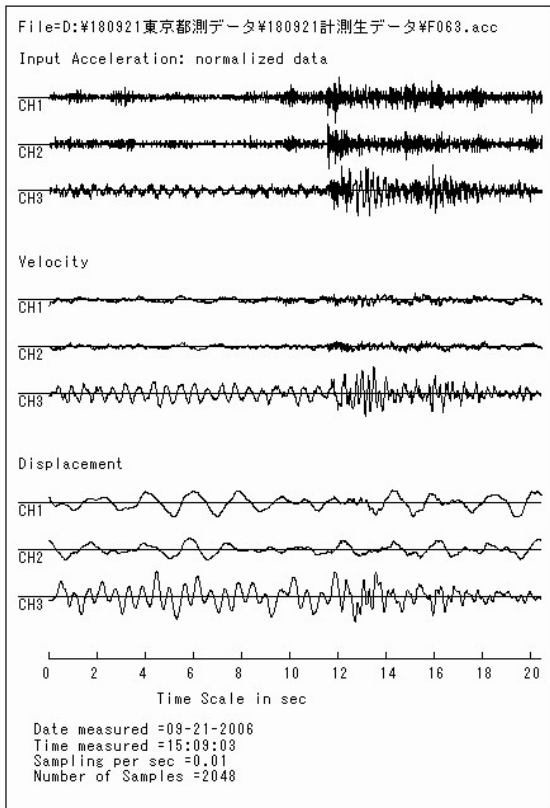
勝鬨橋アーチ中央点 (銀座側)



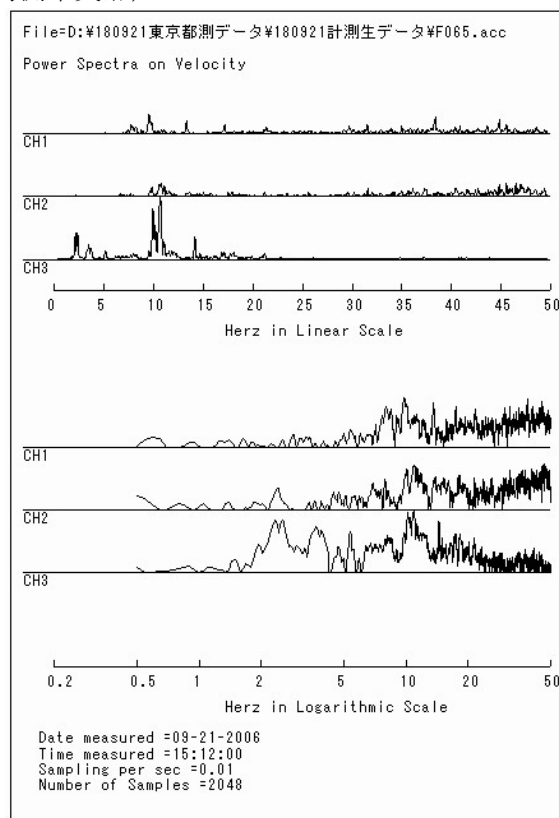
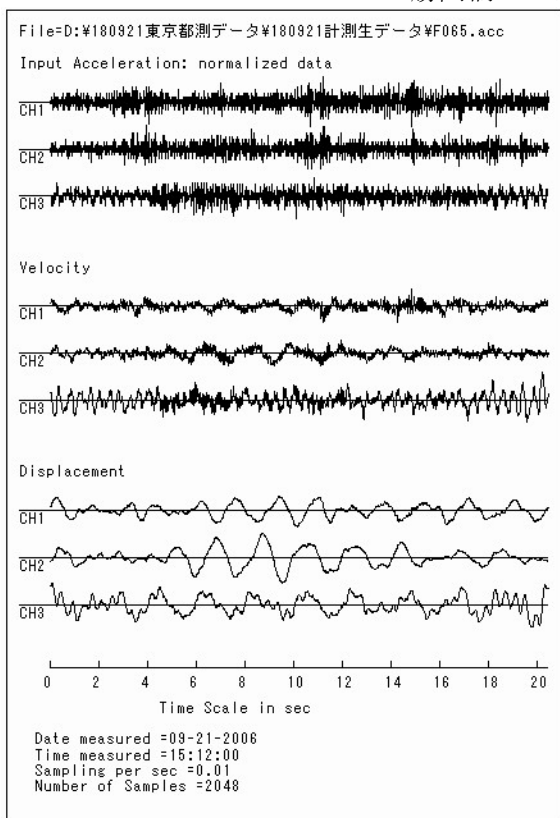
勝鬨橋跳開桁 (ヒンジ部)



勝鬨橋アーチ (月島側 1/4 点)



勝鬨橋アーチ (月島側中央点)



-----///