

振動を測定して 構造物の健康診断をするお話

島 田 静 雄

0. はじめに

日本語の慣用句に「石橋を叩いて渡る」があります。念には念を入れて安全を確かめる方法を比喩的に説明するときに使います。この句には、二つの技術的な意義があります。一つは頑丈に見える石の桁橋も振動する性質があること、二つ目は、振動の手応えを体感することで経験的に安全確認ができることです。

振動を体感して検査をすることは、多くの場面で応用されています。「西瓜の熟れ具合を叩いて調べる」などは日常的な行動です。情報技術(IT: Information Technology)を応用して、殻にひびの入った鶏卵を軽く叩いて、音の反応を分析し、梱包ラインから取り除く高度なシステムもテレビで紹介されていました。人の健康診断でお馴染みの、聴診もそうです。このとき、体に触ったり、軽く叩いたりします。人の場合は、本人に聞く問診もあります。構造物は話しをしません、その周辺の人の通報や、当事者から事情を聞くことは重要な調査法です。

これらの行為で何が分かるかの知見は、専門的な知識と経験とに依ります。この冊子では、石橋に限らず、一般的な建物や橋のような大きな構造物の「健全度を調べる」健康診断」に応用する実用的で経済的な振動測定方法を紹介します。これには、振動計のような特殊なハードウェアシステムと解析のソフトウェアシステムとが必要です。加えて、実際の作業計画を進行させるヒューマンインタフェースも考えます。従来は、特殊な研究所などでしか作業ができませんでした、パソコンの普及などで、一般の設計事務所や、家庭でも利用できる時代になりました。

この冊子は、技術系の学生、若い技術者、さらに一般の人に説明することを考えました。システム構成の説明と、具体的な実例をまとめました。

この報文は18 ページあります

目 次

- 0. はじめに
- 1. 健全度の診断の手順
 - 1.1 疲労は眼に見えない老朽化である
 - 1.2 鉄もコンクリートも腐ること
 - 1.3 眼で見る診断には限界がある
 - 1.4 振動する性質は健全さの指標になる
- 2. 振動現象の力学モデル
 - 2.1 波動と振動とを区別して理解する
 - 2.2 波動に周期性が載る
 - 2.3 波動には縦波と横波の区別がある
 - 2.4 振動は余分な応力を発生させる
- 3. 構造物の振動モデル
 - 3.1 多質点系モデル
 - 3.2 解析し易いモデルを仮定する
 - 3.3 橋桁の曲げモデル
 - 3.4 建築物の剪断モデル
 - 3.5 センサの振動モデル
- 4. センサの種類
 - 4.1 変位計・速度計・加速度計
 - 4.2 小型で持ち運びができること
 - 4.3 ジャイロを使わない回転計測
- 5. 現場測定作業の実際
 - 5.1 三通りの加振方法
 - 5.2 センサを置く場所の吟味
 - 5.3 地盤の振動は複雑である
- 6. 測定データの記録と保存
 - 6.1 アナログ信号の可視化
 - 6.2 振動強さの単位
 - 6.3 データ保存のファイル仕様
 - 6.4 記録作業の立ち上げと停止の制御
- 7. データ解析のソフトウェア
 - 7.1 プログラミング言語
 - 7.2 振動波形の整形処理
 - 7.3 フーリエ解析
 - 7.4 自己相関解析
- 8. 理論モデルで起こる誤解
 - 8.1 天動説と地動説との論争
 - 8.2 地盤の長周期振動のモデル
 - 8.3 長周期振動はエコーで測定される
 - 8.4 フーリエ解析を信用すると説明を間違える
 - 8.5 橋の架設工事で事故が起き易い
- 9. 振動測定の解析例
 - 9.1 清洲橋; 東京(隅田川)
 - 9.2 加茂橋; 愛知県(矢作川)
 - 9.3 コンクリート床版のFWD試験
 - 9.4 道路沿いにあるビル(名古屋インター付近)
 - 9.5 マンションの振動測定(常時微動による観察)

おわりに

索引

英数字					
1質点系モデル	3.1	ジーゼルハンマー	5.1	地盤	5.3
2質点モデル	3.2	ジャイロコンパス	4.3	聴診	0
2主桁橋モデル	4.3	ジャイロセンサ	4.3	超高層ビル	3.4
BASIC言語	7.1	スペクトル解析	7.3	長周期振動	7.4
CSVファイル	6.3	スマトラ島沖地震	2.3	抵抗線ひずみ計	4.1
FFT	7.3	スロッシング	8.2	統計処理	7.2
FWD	5.1	センサ	3.1	利根川	5.3
PC98シリーズ	7.1	再現設計	1.3	ナ	
P波	2.3	時系列	7.3	ノートパソコン	4.2
S波	2.3	自己相関	7.3	新潟地震	3.4
Visual Basic	7.1	自由度	3.1	濃尾平野	8.3
Windows 系	7.1	質点	3.1	振じれ振動	3.2
ア		実行形式	7.1	ハ	
アイドル	6.4	主動土圧	5.3	ハイカットフィルタ	3.5
アナログ信号	3.5	寿命	1.1	バイプログラム	6.1
エイリアシング	3.5	周期	2.1	パルス	8.2
エクセル	6.1	集中質点	3.1	パワースペクトル	7.3
エコー	7.4	重錘落下装置	5.1	ピッチング	2.1
エネルギースペクトル	7.3	重力の加速度	4.1	フーリエスペクトル	7.3
オッシログラム	6.1	衝撃加振装置	5.1	フーリエ解析	6.2
位相角	8.4	丈夫さ、	1.1	プログラミング言語	7.1
移動	2.1	常時微動	5.1	波動	2.1
永久橋	1.2	振動	2.1	発破	5.1
応答振動	3.5	振動モード	3.3	疲労	1.1
カ		振動計	1.1	標本数	3.5
カイン	6.2	振動数	2.1	不等沈下	5.3
ガル	6.2	震度法	2.4	不動点	3.1
キーワード	6.3	扇状地	5.3	分配係数	4.3
加速度計	4.1	線形解析	3.2	マ	
加茂橋	9.2	粗密波	2.3	マス	4.1
科学技術計算	7.1	速度計	4.1	ムービングコイル型	4.1
回転	2.1	剪断モデル	3.4	メキシコ地震	8.2
格点	3.1	タ		モニタ	4.2
管理データ	6.3	タコマ吊橋	8.4	問診	0
関東平野	8.3	タライ	8.2	ヤ	
起振機	5.1	ダンパー	4.1	ヨーイング	2.1
健康診断	0	ダンブカー	5.1	擁壁	5.3
弦楽器	3.3	デジタルデータ	3.5	ラ	
減衰振動	3.5	トラス	9.2	ランダム	5.1
固有振動数	3.3	トラス橋	5.2	ランニングスペクトル	7.3
孤立波	3.3	トリガ	6.4	レーザビーム	4.1
高煙突	3.4	沖積平野	5.3	レーダ	7.4
高速フーリエ解析	7.3	縦波	2.3	ローリング	2.1
清洲橋	9.1	多質点系モデル	3.1	流砂現象	3.4
サ		耐久性	1.1	連続体	3.2
サンプル数	3.5	単振子	3.1	老朽化	1.1
		地震計	4.2		

1. 健全度の診断の手順

1.1 疲労は眼に見えない老朽化である

橋や建物などに代表される大型の建造物が、実用上、十分な**耐久性**（durability）があることを確認する作業は、①調査、②測定、③評価、の三段階で実施します。このうち、測定は、工学的な測定装置、この冊子では**振動計**、を使うことを主題にして解説するものです。建物や橋では、振動が直接または間接の原因となって不具合や破壊事故が多く報告されてきました。とりわけ、地震は深刻な災害になりますので、古くから耐震設計法が研究されてきました。既に建設されている構造物の健全度は、設計時の図面などの資料を参考にするか、外から眺めるか、写真を撮って判断するかなど、紙の上の作文で診断報告がされているのが現状です。その診断を元に、補強工事も提案されています。しかし、補強前と補強後に工学的な測定を行って、具体的な数値で補強の効果を判定することは行われていません。建築物は、原則として静的な環境に建設されます。橋は自動車の通行など、動的な使用環境に曝されますので、機械装置と同じように、**疲労**することも考えに入れます。永く利用できる性質があることを、**耐久性**、俗に言う**丈夫さ**、があると言います。自動車に代表される機械装置は、材料の疲労を考えた**寿命**（life）があります。疲労した材料は、外見では新品と全く区別が付きません。しかし、材質が内部的に変化していますので、その材料は、再利用（リサイクル）には向きません。耐久性には、材質が年月を経ても化学的な変化、つまり、俗に言う**老朽化**、をしないことを含みます。食品などは、新鮮であることが重要です。これも広く考えれば老朽化の過程です。製造年月や賞味期限を見て利用の判断をします。

1.2 鉄もコンクリートも腐ること

橋や建物は、風雨に曝されます。日本は、地球規模の気候で見ると、年間雨量が3倍も多い国です。木造構造物は、寿命を長くすることに苦労があります。橋は、河川などの水環境に多く建設されます。単純な木橋の寿命は、20年程度しかありません。18世紀の半ばからイギリスで始まった産業革命以降、鉄とセメントとが安価で大量に供給されるようになり、鋼とコンクリートとを使った構造物の設計と建設の時代に入りました。鋼とコンクリートを応用すれば、寸法の大きな構造物が建設できます。木造構造物で心配される、火災、腐食、老朽化を考えなくてもよい、手入れをしなくても済む、と信じる誤解を生みました。橋の場合には、**永久橋**と言う名称も使われました。ところが、鉄は錆びます。人工石材であるコンクリートは、天然石材ほどの耐久性がないことも分かってきました。さらに、コンクリートは、案外、透水性があります。鉄筋コンクリートの建造物は、水回りの防水と排水とに神経を使います。鉄筋コンクリート造では、雨水の侵入は、鉄筋の腐食、それに伴う材料の分離から部分的な破壊、さらには全体構造の崩壊の危険にまで進みます。コンクリート造の表面を、打ちっぱなしではなく、天然石材で覆う、瓦を使う、鉄を使う場合と同じようにペンキを塗る、などの維持管理の習慣は、常識になっていませんでした。

1.3 眼で見る診断には限界がある

この冊子では、既存の構造物の調査を主題としますが、未だ実現していなくて、これから建設する構造物の設計診断も含めることができます。既存の建造物では、設計図が残っていれば、**再現設計**の計算をして、耐荷力の計算ができます。図面が無ければ、寸法と材料とを実物の構造で当てる必要があります。損傷の具合などの観察は、実物を肉眼で見ることが基本ですが、写真撮影も多用されます。デジタルカメラが普及してきましたので、種々の画像解析も提案されています。しかし、表面からの観察だけでは、構造物の骨格に必要としている強度上の健全度、さらに、眼でみることができない地盤の状態や基礎の健全度は全く分かりません。橋や建物の耐震性の調査は、現状では殆ど紙の上だけの作文で済ましていることを認識しておきます。

1.4 振動する性質は健全さの指標になる

物に力を加えると変形し、力を抜くと元に戻る性質が弾性です。振動は、この変形が周期的に起こる現象です。したがって、弾性がある物は、何がしかの固有の振動が観察できます。振動すること自体は、物が健全な状態にあることの確認に使うことができます。振動の測定を、年月をあけて二度以上行って比較すると、固有振動数が低くなるか、減衰が早くなって鈍い振動が測定されることがあります。また、同じ構造の複数の物での測定結果を比較すると、欠陥の疑いがある物を指摘することができます。これは、外からの観察では分からなくても、物の内部が疲労などで劣化したり、局部的に破壊していたり、亀裂が増えたりしている、などが想像できるからです。乾いた砂状の集合物は、究極の破壊状態と考えることができます。振動しませんが、逆に、振動を吸収させる性質を応用することがあります。鉄道の砂利道床がそうです。弾性体は、外からの力の刺激がなければ振動が起きません。意図的な加振と測定方法とを工夫すると、健全度の判定に使うことができます。これを、ハードウエア、ソフトウエアのシステムとして構成します。

2. 振動現象の力学モデル

2.1 波動と振動とを区別して理解する

振動現象そのものの学問的な研究は、力学を応用します。物理的な観察モデルを考えると、一箇所の動きを観察するときを**振動**と言い、線状または平面状の広がりを持つ連続体領域全体を対象とするときは**波動**と区別します。振動と波動との区別を説明するモデルとして、小さなボートに乗って大きな波が寄せる海や湖を考えると分かり易いでしょう。振動を数値で理解するときは、**振動数**、またはその逆数の**周期**を使います。ボートの振動は、ボートに固有させた座標軸を元にして、6成分あります。変位分は、上下方向の縦揺れ、左右・前後方向の横揺れ、の3成分です。回転は、左右・前後の曲げ、垂直軸回りの振じれ、の3成分です。これらは、数学的にはベクトル成分として扱います。ボートは、周期性を持った波を受けて振動しますが、波の進行方向がボートに対して或る角度を持つと、6成分すべてが同じ振動数で観察できます。しかし、一般的には6成分ごとに別の周期性がありますので、これを分離して測定するための工夫が必要です。航空機の乗り心地は回転成分の方で言うことが多く、機体に考えた座標軸を区別に使って、**ローリング**、**ピッチング**、**ヨーイング**の用語があります。

2.2 波動に周期性が載る

波動の方は、**向きと速度**とで判断します。波動は、それが伝わる連続体を考え、自由表面を持つ三次元座標系を考えておきます。無限の広がりではなく、境界条件を考えます。水面、さらには、地震の波動が伝わる地盤の力学モデルを考えると、深さ方向には材料条件を考えます。海洋の波は、海底までの深さで波の高さも速度も変わります。地盤は、深さ方向に複雑な地層になっていますし、境界条件がよく分からない場合が多いのです。波動は、同時に周期性が観察されることが多いのですが、こちらは、発信源に周期性がある場合と、波動が伝わる媒体の方の境界条件に関係する場合があります。バイオリンに代表される弦楽器は、弦の振動で音を出します。弦を指で抑える箇所を変えて音の高低を変えます。音の高低は、弦を往復する波動が支点間を定常的に折り返しをする周期で決まります。山登りをして**エコー(こだま、やまびこ)**を楽しむ場所があります。**やまびこ**は、対面する山で音が反射して帰ってくる現象です。谷筋で、こちらの山面でも音が反射する性質があると、減衰しながら何回も音が繰り返します。地盤を伝わる表面波(横揺れ)と、音(縦波)がエコーの周期を持つことも観察されています。例えば、大きな河川で造成された軟らかな沖積層が、両側で固い岩盤で囲われている場所です。地盤の長周期振動は、岩盤間を波動が往復する周期として測定に掛ります。

2.3 波動には縦波と横波の区別がある

地震動は、典型的な**波動**です。地盤の中を伝わる音と同質の**粗密波(縦波)**だけでなく、水面の波のように、地表面を伝わる横波もあります。地震動を観測するとき、**P波とS波**の区別をします。P波は縦波です。沖積平野の地盤内部を伝わる音の速度は、約**3000m/sec**です。S波は横波です。眼には見えませんが、海の波のように、地表近くの変形現象として伝わってきます。S波は、P波よりも速度が小さく、軟らかい地盤の沖積平野では、**400~600m/sec**程度です。これは音速**330m/sec**よりやや早く伝わります。硬い岩盤を伝わる地震動は、一桁ほど速い速度で伝わります。発破を使う工事現場から離れた場所で振動測定をすると、短い時間差で、地盤の縦波、横波、そして最後に音の順で振動が到達する記録が得られます。面白いことに、野ウサギや象は、足で地面を叩き、地盤の中を音が伝わることを利用して相互に情報通信をしています。スマトラ島沖地震(2004)のとき、象が津波の襲来の前に、一目散に山の方に逃げ出したとニュースが伝えていました。一箇所での振動測定では、波動全体、例えば水面の波のように眼で見える現象を除けば、その全体像を知ることができません。建造物の耐震性を調べたいとき、面的な広がりを持つ地盤と、点とみなせるような構造物本体の方との、二つの力学系の性質を知る調査が必要です。

2.4 振動は余分な応力を発生させる

構造物は、受動的な振動(応答)をすることが問題になります。橋の設計では、人や車両を静的な荷重として見積もります。同時に、動的な加振力を余分に静荷重として加えます。これが**震度法**による設計の考え方です。静荷重による静かな変形による応力に加えて、振動すると余分な応力が発生します。車両の通行が無くても、風などを受けて自由振動が起ると、自重による応力分に近い応力が発生します。橋の上を、軍隊が歩調をとって行進したら、大きな共振が起きて落橋した事故も知られています。したがって、橋は安全率を大きく取った設計をします。一方、建物では、大きな外力は風と地震です。橋もそれを考えた設計をします。しかし、地震力の見積もりが難しいので、多くの仮定を考えて計算します。地震災害が起こる度に、計算の考え方の反省が行われてきました。できれば、地震が来る前に、どのような現象が起こるかを調べたいのです。その方法の一つが、「石橋を叩く」原理を応用する振動測定法の提案です。

3. 構造物の振動モデル

3.1 多質点系モデル

最も単純な振動モデルは、**不動点**から紐で錘(一つ)を吊るした振り子です。これを**単振り子**と言います。錘の移動範囲は水平面内の2方向であって、一般的には楕円軌道を描きます。これは、振動方向の自由度が2です。決められた一方向だけ、例えば上下方向に錘を振動させたいときは、不動点と錘とをバネで繋いだモデルを考えます。決められた移動方向だけの振動をさせる、つまり自由度を1にするためには、構造上の工夫が必要です。数学的に扱うモデルは、錘を、寸法のない、重量ではなく質量を持った、**質点**(マス)とします。バネの方は、同じく重さのない弾性的な部材を仮定します。これが**1質点系モデル**です。振動を電氣的に計測する装置を**センサ**(検出器)と言います。速度計や加速度計は、1質点系モデルとして製作されます。上下・左右・前後の方向別振動成分の測定には、3つのセンサを組にします。ただし、速度計や加速度計は、対象物の方の振動応答を検出させますので、錘の方が擬似的な不動点です。構造物の振動を理論的に解析するときは、まず、全体を重さのない梁・トラス・骨組などで構造モデルを構成しておいて、飛び飛びの注目点(**格点**)を決め、その近傍の質量をまとめた集中質点(Lumped Mass)を置きます。質点間は、質量のない弾性部材で繋ぐ構造を仮定します。これが**多質点系モデル**です。

3.2 解析し易いモデルを仮定する

構造物は、マクロに見れば巨大な連続体であって、システム的には多くの部材単位の集合です。構造解析をするときは、力が作用すると変形が生じる範囲を一単位として、注目点を適当な数に抑えます。振動解析には、その注目点に質点を置き、質点が加速度を受けて構造物に力が作用する解析モデルを考えます。ここで注意することは、構造物は3次元的です。一つの質点では3成分の力と変形とを考える必要があります。多質点系の構造解析で、質点をN個仮定すると、原理的には3N組の未知数を扱う連立方程式を立てなければなりません。実践的には、平面構造力学を利用し、解きやすい境界条件を考えて、未知数の数を抑えます。手計算で数値解を求めるのは大変ですので、コンピュータを利用する**線形解析**が普通になりました。精密な解析をするには注目点の数を多くしたいと思いがちですが、実際の振動現象の説明には向かないことや、判断を間違えることも起こります。単純橋の曲げ振動の解析には、支間中央に質点考えたモデルを使います。単純橋の振動は、橋軸方向とそれに直交する振動は大きくなりません。しかし、実際の橋は橋幅があります。筆者は、橋軸周りの捩じれ振動も取り出すモデルとして、図1.のような2主桁の組で構成する2質点モデルを使っています。質点が2個ですので、立体的には6次までの振動モードがあります。二つの質点は横桁で拘束されていますし、橋軸方向水平動と橋の中央での水平面内の捩じれは無視できますので、上下動・橋軸直角方向の水平動・橋軸回りの捩じれ、の3成分を扱うモデルです。

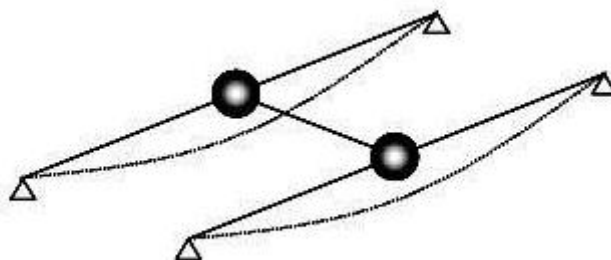


図 1. 二質点を考えた単純橋の振動モデル

3.3 橋桁の曲げモデル

橋桁の上下方向の振動解析には、橋の長手方向に複数の質点を配置した多質点モデルを仮定することもあります。このモデルは、質点の数だけの、曲げの固有振動数と変形の振動モードとを計算するときに使います。この結果は、個別の振動モードが定常的に発現するときの説明に使います。実際の桁の振動では高次の振動モードは殆ど観察されません。一方、橋桁の振動は、弦楽器と同じように、曲げ変形が波動として支点間を往復する性質があります。その波動の速度は、秒速にして約 200 m/sec であることが、経験的に分かってきました。これは、橋の長さがL(m)であると、最も長い曲げ振動の周期がL/100 (秒)になる計算です。吊橋や斜張橋などの長大橋では、これによる長周期振動を測定で確認することができます。しかし、この長周期振動に相当する巨大な曲げ変形の振動モードは、眼に見える様には観察されません。これは、海洋の波で見られる孤立波のような、一種のパルス状の波形が、橋の長手方向に往復するからです。

3.4 建築物の剪断モデル

建築物は、橋とは違って高さ方向に剛性のある、主に**剪断モデル**を仮定します。実在する建築物は、普段、振動することがありませんので、どのような振動モードがあるかは分かりません。地震のときだけ、その隠れていた振動モードが顕在化し、そのモードで応力が作用し、最悪のときに崩壊につながります。したがって、地震で被害を受けた構造物の調査をするときは、構造系のモデルがどのようなものであったかの推定を研究項目にします。地震の被害がある度に、振動モデルの見直しが繰り返されてきました。耐震設計は、どのような振動モードがあるかの構造系の仮定をして応力を見積もります。超高層ビルや高煙突では強風で振動する例があります。基礎が軟弱であると、地震時に基礎部分がヒンジになって、全体が剛体のように倒壊した例があります(図2)。高さのある剪断モデルが振動すると、基礎から $1/3$ 高さの箇所で剪断力が最大になります。図3は、それによる崩壊のモードを証明する写真です。建物の構造強度を上げるには、斜めの筋交いや耐震壁が有効であることが知られるようになりました。構造解析では、本来、構造物を3次元的に見なければならぬのです。建物全体として、前後・左右の水平方向で、図形的にも、また力学的にも対称性を持たせて、程よい剪断剛性を持たせるのが理想です。この対称性がないと、予測にない三次元的な変形、とりわけ、建物の高さ方向に捩じれる変形も出ます。捩じれに関しては構造強度が大きい傾向があり、部材設計の盲点になっています。



図 2. 地盤の液状化で傾いたアパート群

新潟地震(1964年6月16日)のとき、地盤の流砂現象で低層の鉄筋コンクリート造のアパートが、剛体として倒れ込む被害が発生しました。注目したいことは、被害の程度がビルごとに異なることです。これは、ビルごとに基礎の施工が異なるためと考えることができます。

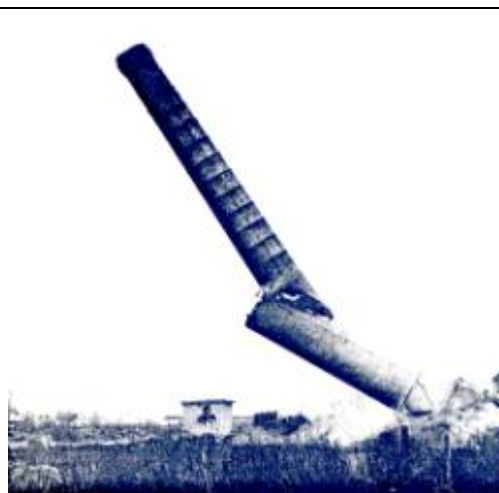


図 3. 煙突の倒壊(ジャール・ウエーカー)

コンクリートの煙突を破壊させたときに撮影された珍しい写真です。振動で変形をするとき、横方向の剪断力が最大になる箇所は、下から $1/3$ 付近の高さです。剪断強度の低い搭状のモデルは、この箇所です折れます

3.5 センサの振動モデル

センサそのものは、外部からの振動を受けて応答振動をする装置です。これ自身も1質点の力学系ですので、一つの固有振動数があります。その振動数のところで感度が最大になり、それ以上とそれ以下の振動数の応答が下がります。そのため、粘性を持ったダッシュポットの作用をする材料を組み合わせることで減衰振動の性質を持たせ、或る振動数の範囲で、実用的に一定の感度が得られるように製作します。その応答の特性を知った上で振動計として使い、外から伝わる振動の性質を取り出すようにします。構造物の振動を測るセンサは、固有振動数にして最大で2KHz程度で使います。振動は、電気的にはアナログ信号です。これをレコーダに記録するときは、デジタルデータとして保存するようになりました。そのサンプル数(標本数)は、1秒間に200、または1000にしています。このサンプル数は、対象物の振動数にして、半分の100Hz、または500Hzまでの計測を考えています。アナログデータの方で、この振動数以上がある波形は雑音ですので取り除く必要があります。単純にデジタル化すると、高音部のデータは、その半分の周波数で折り返して記録されます(**エイリアシング**と言います)。誤差の原因となりますので、電子回路側で除去するにはハイカットフィルタを通します。そうしても、雑音的な信号は残り、スペクトル処理結果の質を落としますので、デジタル処理でソフトウェア的に除去する方法も工夫します。この説明から分かるように、振動測定システムは、センサ、それを制御する電子装置、そしてデジタルレコーダのセットとして設計・製作されています。

4. センサの種類

4.1 変位計・速度計・加速度計

振動の6成分のうち、移動成分を測定する**センサ**の原理は、或る**不動点**からの距離の変化を取り出すことです。橋では、上下方向の変形(たわみ)を調べたいことがあります。橋の真下に杭などを打って不動点を決めることができると、そこをワイヤで結んで、簡単な変位計を取り付けることができます。この方法では、周期の長い変位測定に向きます。指向性の強い**レーザビーム**を応用して、離れた場所から、測定対象位置に投影された光点の変位を、望遠鏡で観測する測定法があります。しかし、野外に持ち出す計測装置としては取り扱いが不便ですし、経済的でもありません。設置場所にも注意が必要です。レーザビームを発射する方の不動点も雑音的な振動を拾います。眼にも危険ですので、野外の振動測定には向きません。外部に不動点を必要としない振動センサには、**加速度計**または**速度計**を使います。音響機器のマイクロホンも同じ電氣的・機械的な原理を使った製品です。周波数の高い音を拾うような特性を持たせますので、構造物の振動のような、方向別の成分として、低周波領域の測定に向く製品は、別に開発されています。単位の振動センサの力学モデルは、一方向に移動を制御した1質点モデルです。振動させる質量のあるマス(Mass)の方が擬似的な不動点になり、それを納めるケースにバネとダンパーとで繋がります。ケースを測定対象に取り付けます。バネの変形は電気信号で取り出します。**抵抗線ひずみ計**の原理を使った加速度計は、振動数にして0~2K Hz程度の感度があります。重力の加速度も測れますので、加速度計を垂直と水平に置き換えることで、センサの感度を校正することができます。速度計は、**ムービングコイル型**のセンサです。1 Hz以下の低周波数の領域で感度が低くなるのが欠点です。

4.2 小型で持ち運びができること

地震計は、原理的には振動測定器です。その地域を代表とする基礎地盤の地震動のデータ収集に特化した装置です。設置場所も厳選されますが、その場所の地盤条件によって、地震記録がやや異なった結果になることもあります。構造物の管理を目的とする場合は、複数の簡易な振動計を使うことができます。地震は、いつ来るかが予測できません。24時間継続してデータを記録する方法を工夫します。地震のときは停電することも考えられますので、電池駆動を原則とします。電池の消耗を補助するバックアップ電源も持たせます。構造物の健全性を調べることを目的とするときは、その都度現地に出掛けていって、短時間の振動計測ができるポータブルな測定装置を利用します。三軸の振動計の向きは、構造物の座標系に合わせ、必ずしも地球の東西南北方向にこだわりません。地震待ちをしないで、強制的な加振、つまり「石橋を叩く」原理で測定することを計画すると、一回の測定データは40秒もあれば十分です。橋の健康診断の場合には、場所の移動時間も含めますが、一日に十橋程度の測定をこなすことができます。装置全体は電池駆動で設計します。移動用自動車のバッテリー、さらには商用の電源も使えるようにします。現場でのモニタには、ノートパソコンを使うことができるようになりました。これも、充電電池の利用時間が長くなってきました。

4.3 ジャイロを使わない回転計測

コマの原理を使った**ジャイロコンパス**は、航空機や船舶の位置測定に利用されていた、特殊で高価な装置でした。コマを使わず、加速度計を応用して角速度を検出する**ジャイロセンサ**は、小型化できます。産業機械、自動車、ロボットの制御などに応用されるようになりました。構造物の振動は回転成分が小さいので、ジャイロセンサを使う測定は実用になりません。それに代えて、3成分の加速度計のデータから、回転成分を判定する方法を使います。橋梁の場合、道路中心線回りの捩じれ振動がでます(図1.参照)。この大きさは、幅員の端での上下動、または、橋軸に直交した水平方向の振動成分に含まれて測定に掛ります。橋全体の捩じれ剛性が小さいと、幅員の端に荷重車が載ると、大きな捩じれ変形がでます。長い支間を渡すには、相対的に大きな横幅で設計しなければなりません。捩じれ剛性の大きな箱桁で主桁構造を設計すると、幅員を広げなくても、支間の長い橋が設計できます。実際の橋全体の構造で、捩じれ剛性を定量的に扱うときのパラメータには、2主桁橋モデル(図 1.)を仮定して左右の桁の**分配係数**を計算します。振動計測をして、上下動と捩じれ振動の振動数が得られれば、分配係数を計算することができます。

5. 現場測定作業の実際

5.1 三通りの加振方法

構造物が健全であること、さらに耐震性があることを確かめるには、地震の襲来を待たず、意図的な加振をさせて、振動測定をすることが効率的です。その加振方法は3種類あります。①:周期的な加振ができる機械式の起振機を使うこと、②:構造物の周辺でダンプカーなどの重量車を走らせてランダムな振動を発生させること、③:衝撃的な外力で起振させること、です。まず一つ目ですが、起振機は特殊な装置ですので一般的な利用には提案できません。二つ目は、橋梁の振動測定では定番的に利用する方法です。交通の多い道路沿いの住宅や建物でも、この測定方法が応用できます。重量車の通行が少ない場合には、ダンプカーを手配する必要があります。住宅地などでは、周辺の居住者の了解と、所轄警察の許可が必要になることがあります。三つ目が、叩く原理を使うことに当たります。その方法として、小さな橋では、数人の人が同期をとってジャンプして加振することもできます。

道路舗装の検査に使う重錘落下装置を搭載した(FWD)測定車があります。小型の、錘落下装置は、持ち運びが簡単ですので、コンクリート床版などの健全度を測定する衝撃加振装置として便利です(図4)。工事現場で発破を使うことがあると、或る程度離れた場所でも振動の測定ができます。この見方から言えば、地震動の観測も一種の衝撃試験とみなすことができます。建設工事で杭打ちにジーゼルハンマーが使われていた頃、騒音と振動が大きいので、公害であるとの苦情が頻発しました。しかし、その周辺の構造物と地盤の振動性状を測定できる絶好の機会でした。なお地盤は、なにも加振をしなくても、常時、微小な振動(常時微動)が観察されます。振動レベルは低いのですが、振動計の感度を上げると、良いデータを示すことがあります。



図4. 小型の FWD 用加振機を使う例

5.2 センサを置く場所の吟味

構造物本体に起振装置を直接に使うことは、床などの小範囲の調査目的に限定し、地盤の方から基礎を介して伝わってくる間接的な応答振動を測定します。そうすると、センサの設置場所を、複数箇所選ぶ必要があります。3成分のセンサを組みにしたものを一つのシステム単位とすると、数箇所ですべての測定を計画するには、複数のシステムが必要になり、測定時間に同期を取るなども含めて、大掛かりになります。それに代えて、一つのシステムを数箇所に持ち回って測定し、構造物全体の振動の性質をソフトウェア的に解析する方法を工夫します。この場合、大きな振幅が得られる測定箇所を選択するだけでなく、振動方向によっても、また波動ならば、節に当たる様な、振動の出ないと思われる箇所も選びます。つまり、振動しないことを確認することも重要だからです。トラス橋の場合、格点にセンサを置くと、トラス弦材の振動を拾いません。格点と格点の間、床組上で測定すると、床版の振動と、トラス構造全体の振動とが合わさったデータが得られます。橋の測定は、主構造だけでなく、橋脚や橋台、さらに地盤そのものも、比較の対象として振動測定をしておきます。

5.3 地盤の振動は複雑である

構造物が建設される場所の地盤の性質は、ほんの少し位置が変わっただけでも大きく異なることがあります。宅地造成で切土・盛土された場所が混じると特に複雑です。貯め池であった場所を埋め立てて建設された住宅や団地では、地盤が落ち着くまでに不等沈下を起こす苦情が良く起こります。ダンプカーなどの重量車を走らせて地盤の振動を測定すると、埋め立て箇所では局所的に大きな振幅の振動が観察されることがあります。自然地形であっても、沖積平野は一種の埋立地です。関東平野は利根川が造成した巨大で厚みのある軟らかな地盤です。利根川の下流にある橋の振動測定をしたとき、遠くを走っているダンプカーによっても橋の振動が観察されました。これは、硬い岩盤まで橋の基礎が到達できないため、いわば軟らかい地盤に浮いた状態になっているためと推定しました。扇状地は、地すべりで土砂が堆積した場所ですが、その全体は、未だ主動土圧が生きていて、何かの切っ掛けがあると地滑りが再発する危険地帯です。こちら扇状地本体と、それを外れた場所とは振動の性質が全く異なります。人工的な構造物である擁壁や石垣は、言わば地滑りを抑える構造物とみなすことができますので、擁壁の上部と下部とで地盤振動を測定すると、安全性の判断に使うことができます。

6. 測定データの記録と保存

6.1 アナログ信号の可視化

振動現象は、感覚的にしか経験できませんので、具体的に眼に見えるデータにするには、波形をオッシログラムに描いて観察します。古典的な地震計は、エジソンの最初の蓄音機と同じような構造を持ったドラム式の装置を使いました。ドラムに紙を巻きつけ、その全体を石油ランプの煤でいぶし、振動波形を引っかいて記録します。ドラムは 20 分で一回転し、糸を巻きつけるように波形の中心軌跡をずらしながら一日分の波形を記録する方式でした。記録された紙は、煤が落ちないようにニスで定着させ、それを切り開いて、振動波形を計測します。毎日記録紙を張り替えるため、大変な手間が掛りました。現在では、センサで得られるアナログの電気信号をデジタル化し、大容量のメモリに記録し、改めてパソコンのモニタにグラフィックス図形で描くことができるようになりました。波形データの保存にエクセル(MS-EXCEL)を使うと、グラフ作図機能を利用できます。筆者は、オッシログラムを模したグラフをコンピュータグラフィックスの応用で作図しています。これをパイプログラムと名付けました(図 6.参照)。

6.2 振動強さの単位

センサで得られるアナログの電気信号は、加速度計ではガル(cm/sec^2)、速度計ではカイン(cm/sec)、の単位で数値化します。このとき、適度な大きさの 2 バイト整数型で表されるように感度調整をします。構造物では、応答振動の強さよりも、固有振動などの周期性を調べることに主眼を置きますので、グラフで波形を描くときは波形高さを標準化して、成分間の強さの比較ができるようにします。美しさは必要ではありません。グラフ化するときの整数値は、有効数字にして 3 程度、 ± 1000 の数値範囲で得られるのが理想です。フーリエ解析に利用するときは、実数型のデータにします。その波形データは、測定器側で大容量のメモリにファイル形式で保存します。連続的な記録は、巨大な一単位のデータファイルではなく、パソコン処理に便利のように、小寸法のファイル集合に構成します。パソコンでは、このデータ単位で扱うと便利です。エクセルは、一行 4 成分までの整数データを単位として、複数行の記録を扱います。古いバージョンのエクセルでは、最大 64K までの行数制限があります。毎秒 200 個でサンプリングすると、8K の行数は 40 秒の記録長さになります。地震波形のような衝撃的な加振現象を考えると、振動が比較的速く減衰しますので、毎秒 1000 個のサンプリングで、16K の行数があれば 16 秒の記録長さを単位としたファイル寸法になります。複数のファイルにまたがるデータの切り貼りを考えて、1 ファイル当たりの行数は 8K または 16K に抑えます。

6.3 データ保存のファイル仕様

一単位のデータファイルは、管理項目(測定日時、場所、サンプリング周期、測定単位など)を記録したテキストファイルと、整数型数値の集合を収めたバイナリーファイルとの対で構成します。前者は 1K バイトに満たない寸法ですが、後者は 64 KB 程度になります。バイナリーファイルは、科学技術計算のできるプログラミング言語、例えば Visual Basic 6.0 で読み書きしなければなりません。一般向けには、ユーティリティプログラム使って文字型の数値データに変換し、エクセルの CSV ファイル形式に直します。そうすると、ファイル寸法は 5~10 倍ほどに膨れ上がります。しかし、管理データを含めて一種類のファイル単位でまとめることができる利点があります。この方法は、行頭にキーワードを定義しておいて、キーワードに続けて管理データを記入しておく、これを判断して解析処理をするプログラムを開発できます。

6.4 記録作業の立ち上げと停止の制御

地震による応答振動を記録するには、24 時間連続して振動データを記録するシステムを設計しなければなりません。意図的な加振で構造物の振動応答を測定するときは、手動で起動させ、上の項で説明した測定秒数単位で作業が自動的に停まる方式が便利です。連続的にデータを記録したいときは、複数のファイルに、データが論理的に連続するように制御を設定します。継続的に測定させる設定をしたときは、停止は手動です。衝撃的な振動は、振動の立ち上がりをトリガで検出して振動記録を開始させます。このとき、振動の立ち上がり前の短い時間のデータが重要ですので、測定器をアイドル状態で生かしておいて、循環的にデータを内部に保存しておきます。トリガが立ち上げを検出すると、このアイドルデータをファイルの頭に追加させる記録方式を設計します。

7. データ解析のソフトウェア

7.1 プログラミング言語

何かの処理をしたいとき、実行形式になった出来合いのソフトウェアがなければ、何かのプログラミング言語を使って、開発しなければなりません。1980年代から1990年の初めころまでは、NECのパソコンPC98シリーズが多くの分野で利用されました。その人気が高かった理由の一つは、使い易いBASICプログラミング言語があったからでした。パソコンのOSがWindows系に移行すると共に、Visual Basicが利用されるようになりました。筆者は、2010年頃までは、Visual Basic 6.0を利用していました。最近のパソコンは、デジタル写真の処理と、ビジネス指向のWORDやEXCELの利用が多くなりましたので、スペクトル計算ができるような科学技術計算を指向するプログラミングツールを利用する環境が不便になっています。一般に、プログラミングの動作環境はOSの仕様に大きく影響されます。実行形式にまとめたソフトウェアはWindowsのバージョンに対応する対策に追われます。ベンチャー企業が開発したソフトウェアは、当座は便利であっても、バージョンの改定に対応するユーザサービスが不親切になる障害も多くあります。幾らか保守的なように見えても、信用のおける大資本のソフトウェア企業に開発を任せるのが安全です。

7.2 振動波形の整形処理

連続した時間単位で振動データを記録すると、あまり意義のないゴミのような記録も含まれます。有効な記録としてデータを保存するか、捨てるかは、全体の抄録のようなグラフを作成するソフトウェアを筆者は開発して判断に使っています。まず、オシログラム形式のグラフある**パイログラム**があります。これを描くときは、データの平均値を0にすること、波形の高さを或るレベルにすること、ドリフトを除くこと、などの基本的な統計処理をします。これらの処理は、エクセルの組み込み関数を利用しても処理ができます。振動にどのような周期成分があるかを解析するにはフーリエ解析が必要です。これも努力すれば、エクセルでも処理ができますが、あまり能率的ではありません。したがって、科学技術の計算に便利なプログラミング言語でソフトウェア開発をするのが最善です。

7.3 フーリエ解析

振動データのように、時間的に変動する現象の数値データの並びを**時系列** (time series)と言います。その主要な解析処理には、スペクトル解析と**自己相関** (auto-correlation) 解析の二つがあります。フーリエ計算は数値計算に時間が掛りますので、**高速フーリエ解析** (FFT) を応用できるデータ長で切り出します。振動現象は気まぐれな面があって、或る振動周期が時間的に出たり出なかったりします。単発的な解析では、雑音か意義のあるピークであるかの区別ができないことがあります。そこで、データを切り出す区間を時間的にずらしながら、複数のフーリエ解析のグラフを縦に並べる図化方法を考えました。筆者は、これを**ランニングスペクトル**と呼ぶことにしました(図6、図8参照)。

7.4 自己相関解析

時系列のデータ並びから、一定長さに区切って二箇所のデータ並びを取りだして相関値の計算をします。この2箇所は、一つの時系列について、時間差を変えて二組のデータ並びを切りだして相関値の計算を考えます。時間差を変数にした関数表現を**自己相関関数**と言います。これをグラフに描くと、時間軸0で最大値になり、左右時間方向に对称で幾らかの周期性を示しながら減衰していく図形になります。対称性を示すこのグラフをフーリエスペクトルに変換したものを、数学的な方でのパワースペクトルと定義しています。自己相関のグラフは対称図形ですので、実用的には時間軸の右側だけの波形を使います。振動現象の解析に応用すると、パルス状の衝撃を与えたときの速度応答に近似した図形が得られます。この自己相関関数のグラフを再帰的に入力振動波形の扱いをして自己相関の計算を繰り返すと、雑音成分が消えていき、きれいな減衰振動に近づきます。これから対象物の固有振動数と減衰率とを求めることができます。一方、相関関数の代表的な応用装置が**レーダ**です。ランダムな波形強さを持つ電波を発射し、対象物から反射して帰ってくる電波との相関計算をすると、対象物までの距離が時間差をもったピークで得られます。原理的には**エコー**の周期を求めます。振動データの解析では、自己相関の解析は、いわゆる長周期振動の周期を発見することに応用できます。

8. 理論モデルで起こる誤解

8.1 天動説と地動説との論争

天空の星の動きを説明するモデルとして、古くは、天空に巨大な球面があって、それが回転するモデルが考えられました。自分自身が回転すると、相対的に外部の景観が回転しているように見えます。地面は、動かないものだとする日常の経験が先入観になって、天動説が宗教的に正しい解釈とされていました。

8.2 地盤の長周期振動のモデル

1985年のメキシコ地震では、震源から400 Kmも離れたメキシコシティで、周期2秒の地震動が3分近くも持続し、多くのビルが共振して倒壊しました。このことがきっかけになって、地震のときに発生する長周期振動が注目されるようになりました。メキシコシティは、大きな湖を埋め立てた軟らかい地盤で造成された地域です。この地盤構造の力学モデルについて、さまざまな仮説が立てられました。メキシコシティは、硬い岩盤がお盆状になった地形を埋め立てた軟弱な地盤構造になっていますので、言わば、大きなタライに水を張り、その水が全体として左右に揺れるスロッシング (sloshing) モデルが考えられました。しかし、そうであると、水の運動エネルギーは全体で巨大になりますし、タライの周で大きな上下動が出るはずで、次いで、地盤の表面を伝わる波動が往復するモデルが考えられました。これは弦楽器の振動と同じように地盤が全体として振動するモデルですが、これも地盤全体の運動エネルギーを考えると、共鳴振動は考えられません。パル状の孤立波ならば、運動エネルギーの大きさが小さくても、表面波の周期的な往復運動が起こります。つまりエコーです。階数の多いビルでは、パルス状の加振でも大きな、持続的な共鳴振動に成長します。重い釣鐘は、単純に押すだけではビクともしません。手を当てて周期的に押す操作をしていると、大きな振幅に成長することは、古典的な言い伝えとしても知られています。

8.3 長周期振動はエコーで測定される

地震の際、それも遠方で起きた地震波動を受け、超高層ビルが固有振動として3～7秒の長周期で同期振動することが話題になってきました。この解釈に、地盤自体の力学構造に長周期の卓越振動の周期があると信じている人が多いです。この振動数は、1質点系原理の振動計では感度範囲を外れますので検出できません。波動のデータから自己相関関数を計算することで見つけることができます。エコーは、表面波のような横波だけでなく、音、つまり縦波でも観察されます。濃尾平野のような広い沖積平野では、川筋を挟んでエコーが往復します。広い関東平野では8秒から10秒の周期があるとのレポートがあります。このエコーが周期性を持つのは、谷筋のような、やや個性的な地形構造を持つ箇所です。

8.4 フーリエ解析を信用すると説明を間違える

時系列である振動データの、或る時間間隔を数学的にフーリエ変換で解析すると、見かけ上、多くの固有振動数が見つかります。地震動のようなパルス状の加振での振動波形であると、すべての振動周期成分が一定強さで含まれるように計算結果がでて、長周期成分の周期を指摘することができません。周期性の無いランダムな加振の場合、すべての周波数成分の加振力が、ほぼ同じ強さで含まれるのですが、円振動としての位相角がバラバラになっています。パルス状の加振では、それが揃っている場合です。統計解析の見方からは、パルス波形と、ランダム波形は、どちらも質のよい加振です。また多質点系の振動モデルを理論解析すると、複数の固有振動数とそれに対応する振動モードが得られますが、実際の振動現象の観察では、必ずしもすべての波形が現れるとは限りません。例えば、支間の長い吊橋や斜張橋は、低次の振動モードで全体構造が振動することはありません。そのような現象が観察されるときは、破壊が進んだときです。タコマ吊橋が風を受けて落橋した事故が有名です。このとき支間中央に節のある非対称の曲げ振動が観察されていて、それが、捩じれ振動に変わり、部材が短時間で疲労して落橋につながりました。

8.5 橋の架設工事で事故が起き易い

上下方向の振動を扱うとき、質点をバネ支えたモデルを考えます。このバネには質点の重力が作用して撓む(たわむ)分だけの初期値があります。そこで、重力による静的撓み δ_m をパラメータにして振動の周期 T (秒) との関係性を求めると、簡単な近似式 ($\delta = T^2 / 4$) が得られます。この力学的な意味は「自重を振動方向に静的に作用させたときに生じる最大撓み δ はその方向に振動する振動周期 T の2乗に比例します。振動の向きとは関係がありません。数値的に説明すると、周期1秒の振動は静的たわみが約25 cm; 2秒で1 m; 0.1秒(10ヘルツ)で2.5 mmです。橋梁工学の課題は、架設の過程の方に、興味ある力学問題が豊富にあります。破壊事故は、構造系が不安定な架設の段階に起こりがちです。安全確認の計算には、振動方向に自重を作用させて最大たわみが1 mを超えないように、構造系を制御してはどうか、と或る委員会が提案したのですが、賛成してくれる人はいませんでした。

9. 振動測定の解析例

9.1 清洲橋;東京(隅田川)

寸法の大きな橋梁の簡易振動測定として、清洲橋(図5)のデータ解析例を示します。重量車が橋に進入して通り過ぎるまでの約40秒間のランダムな加振で計測しました。ランダムな波形記録は、解析には向かないと考えがちですが、ランダムであるほど、統計的に質のよい結果を計算できることが理解できると思います。



図 5. 清洲橋全景(倉西撮影)、藤井資料番号 fuji19803

図 6.の左は、3行並びの連続した波形単位を折り返してオシログラム風に作図したバイブログラムです。測定時間は約40秒ですので、行幅が約 10 秒長さです。3本の波形は、上から道路中心方向の水平動、それと直交する横向きの水平動、上下方向の振動です。センサの設置場所は歩道上です。時間的に、振動波形の強さも変化していることが分かります。図 6.の右がランニングスペクトルです。3 組のランニングスペクトルは、3成分振動単位別です。橋の座標軸方向で個別の卓越振動が現れていることが分かります。最下段は上下動のランニングスペクトルです。3つの卓越振動があることが分かります。橋の上下動は、波動として橋長方向を往復する性質があります。清洲橋は3径間に橋桁が連続していますので、中間橋脚が波動の節の作用をして折り返しが起きて、3つの卓越振動が測定されていることに注目します。なお、センサの設置場所が歩道上ですので、水平方向に局所的な高い振動数が得られています。

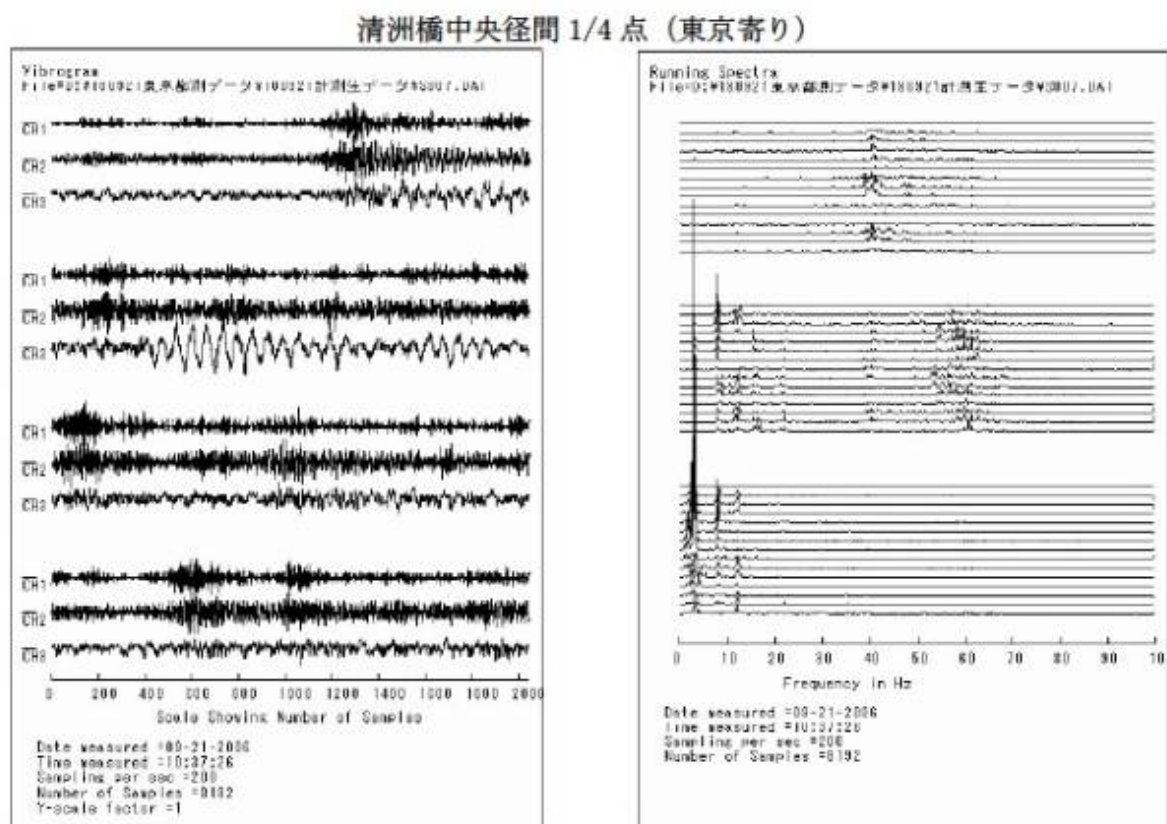


図 6 清洲橋の振動のバイブログラム(左)とその波形解析のランニングスペクトル

9.2 加茂橋;愛知県(矢作川)



図 7. 加茂橋の全景—藤井資料番号 fujii16621

加茂橋は、コンクリート床版が部分的に損傷していたこと、また床版の厚みが不足していたこと、床版自体の耐荷力の不足が懸念されていたこともあって、床版の増し厚が計画されました。その前に、トラス構造全体の対荷力の確認を含めて、振動測定を行いました。床版の補修と増し厚の工事が済んだ後、同じ方法で振動測定をして、補修前と補修後のデータを比較しました。図 8 は、補修後の振動測定のランニングスペクトルです。測定箇所は、トラス支間の中央、横桁間で支持されている床桁支間の中央です。この位置は、トラス本体の振動と、床版の振動とがまとめて測定される場所です。床版はトラス格点の横桁で支えられた、別システムの構造系が組み合わさった複合構造系とみることができます。このランニングスペクトルから分かったことを説明します。

ランニングスペクトルは、上段から、橋軸方向の水平動、橋軸直角方向の水平動、垂直方向の振動です。最下段のグラフは、トラスのパネル割りが5ですので、明瞭な5本の卓越振動が見られます。この内の最も低い振動数は、トラス構造の主曲げ振動と同期していて、約 3 Hz です。残り4つは床版の横桁位置での波動の折り返しで決まる固有振動です。

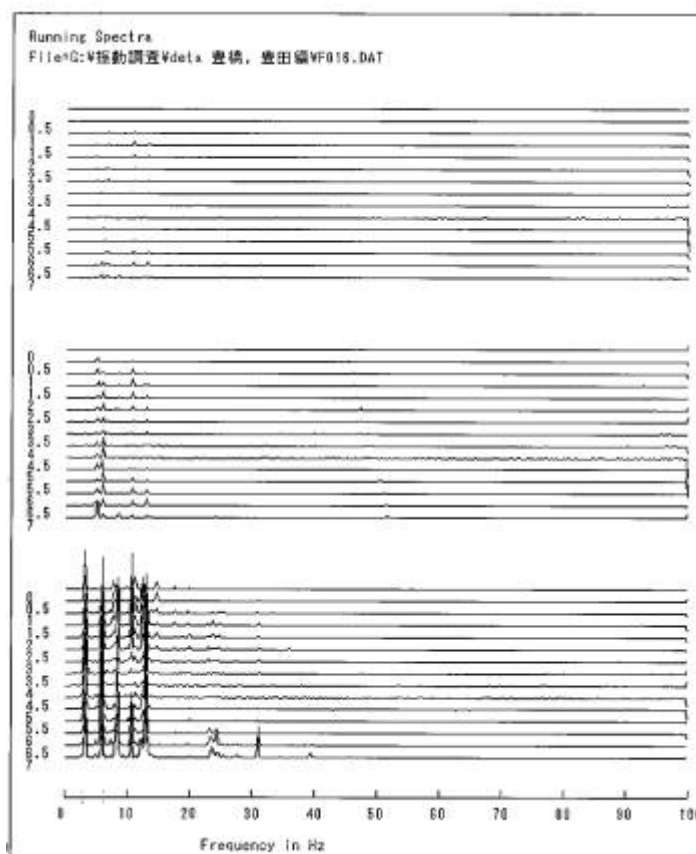


図 8. 加茂橋床振動のランニングスペクトル

上下動の振動では、やや高い振動数が見られますが、レベルは低くなっています。これは、スラブの幅員方向の曲げ振動と考えられます。なお、床版の補修前の振動調査で、コンクリートに損傷のあるスラブ支間では、波動の折り返しができなくなっていたため、図5にあるような明瞭な5本の卓越振動が見られませんでした。この測定結果から、床版コンクリートの補修が成功したことを確認することができました。

中段のランニングスペクトルは、トラス本体の振れ振動を拾っています。第 2.5 節で説明した分配係数の計算に応用します。橋軸方向の振動はほとんど測定に掛りません。しかし、ここでは例示しますが、山側の橋台は、荷重車が進入したときに橋軸方向の振動がみられましたので、この橋台に問題があると判定しました。実際にも土盛り部分との間に隙間が見られました。

9.3 コンクリート床版のFWD試験

第 5.1 節の図4に示した簡易な重錘落下装置を使って、オフィスビルの鉄筋コンクリート床版(約4 m 幅の正方形)で衝撃試験をしたときの解析例を示します。衝撃による振動は、短時間、ほんの数秒間の減衰振動です。振動測定は、サンプリング周波数1KHzに設定し、1 単位 of ファイルは 16 秒長さの記録です。衝撃の瞬間が測定秒数の範囲におさまるようにするには、測定器側をアイドル状態で起動しておいて、トリガが衝撃を検知したら、データの記録が始まるようにする半自動の記録方式を採用します。測定器がアイドル状態にあるとき、あらかじめ短時間の振動を内部的に循環式に記録しておいて、その記録をファイルの先頭に書き込むように設定します。この部分を含めて、約2秒間の波形データを切り出して解析に使います。

加速度の記録①から、数値積分を使って、②速度さらに③変位の振動を数値計算で求めることができます。図 10 は、この三つを並べて図化したものです。速度記録をFFTで解析した $\sin, \cos$ 成分の 2 乗和から、パワースペクトルを計算したものを、その下に図化してあります。卓越振動は、3つあることが分かります。重錘落下装置は、錘が落下して2~3 回リバウンドをします。それが加速度データに現れています。しかし変位の波形記録になると、リバウンドを図形的に確認することができなくなっています。このリバウンドの周期が、スペクトル解析では低周波領域で大きなピークとして計算されています。残りの二つが、コンクリート床版の曲げ振動です。固有振動は二つあるのは、一つは曲げ振動、もう一つは縦波(音)の方を拾っていると推定しました。

図 11 は、加速度記録を使って、自己相関関数を計算し、それをコサイン変換してパワースペクトルを計算したものです。自己相関関数は時間軸 0 で対称な性質がありますので、その対称な曲線を FFT で解析してコサイン成分に注目すればパワースペクトルの計算ができます。

なお、加速度記録から変位までの積分計算では、センサの電気信号を電子回路を使って積分することも考えられますが、神経質なドリフトの影響を除く処理には向きません。数値計算で積分処理をするときは、単純梁のモデルを使うのが実用的です。測定長さ(ここでは約2秒)間の加速度分布を荷重とみなして、この長さの単純梁に作用させて、曲げモーメントとタワミを計算するのです。衝撃的な振動は静止の状態から減衰して静止の状態に戻る現象です。単純梁の力学モデルを当てはめると、曲げモーメントとタワミとは、左右の支点で0の境界条件を満たします。

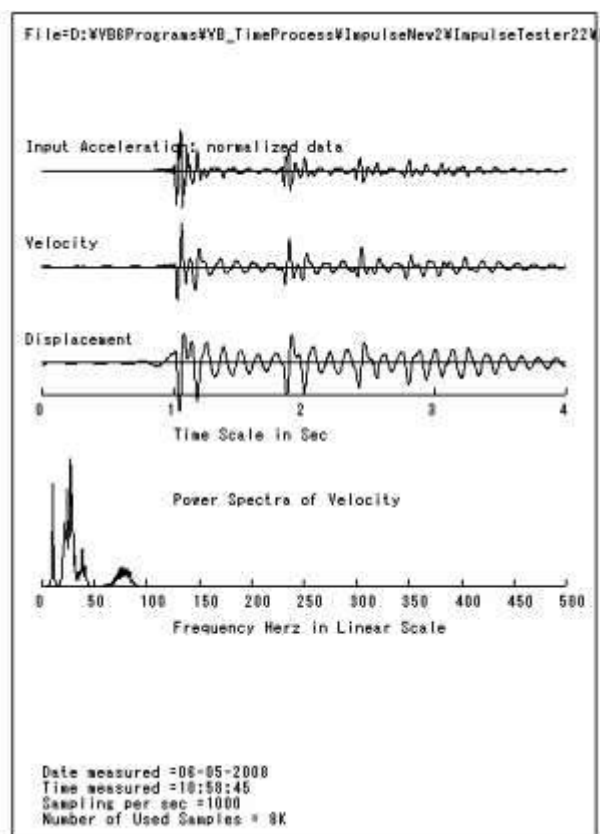


図 10. 加速度記録から速度・変位を計算した

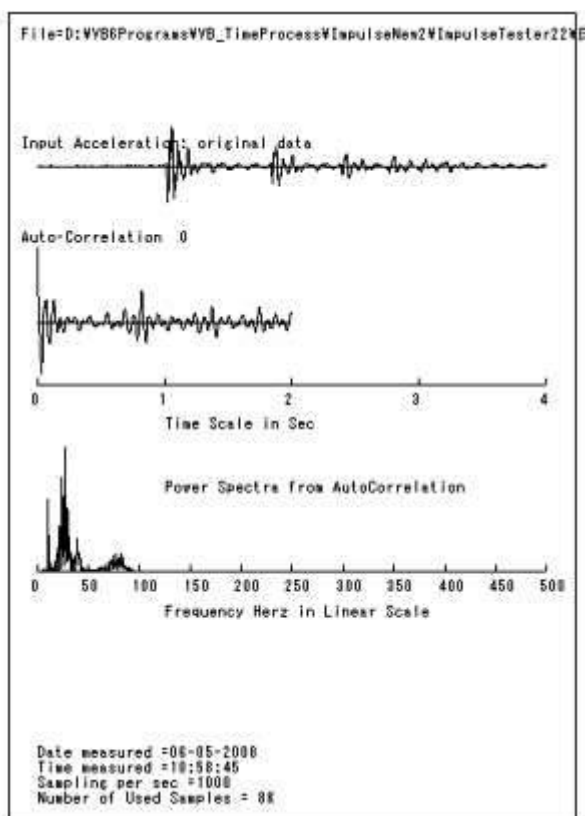


図 11. 自己相関関数を計算した

9.4 道路沿いにあるビル(名古屋インター付近)

交通量の多い道路沿いに在る住宅やオフィスビルは、騒音と振動とに悩まされます。図12は、名古屋市東部、名古屋インターに通じる道路沿いの状態を撮影した写真です。その道路に面した、5階建てのビルの2階に(株)東京測器研究所名古屋支店が入居しています。その場所で測定した振動データと解析例とを図13と図14に示しました。その道路は、名古屋高速の高架橋もあって、そこを通る重量車によると思われるデータは、別の測定で見られています。写真の右にある一本橋脚の振動測定はしませんでした。

加速度計はビルの窓側に置きました。振動記録では、何台かの自動車(3軸トラックを含む)が間隔を空けて通過している状態が分かります。騒音は 50～70 Hz に見られますが、これは自動車エンジンの回転数にして 3000～4000 RPM に当たります。スペクトル解析では、水平方向の成分として、25 Hz 前後に二つの卓越振動があります。これはビルの横揺れと判断できます。上下動方向には、目だった振動がありませんので、ビル本体の基礎はしっかりしていると判定できます。



図 12. 道路沿線の写真

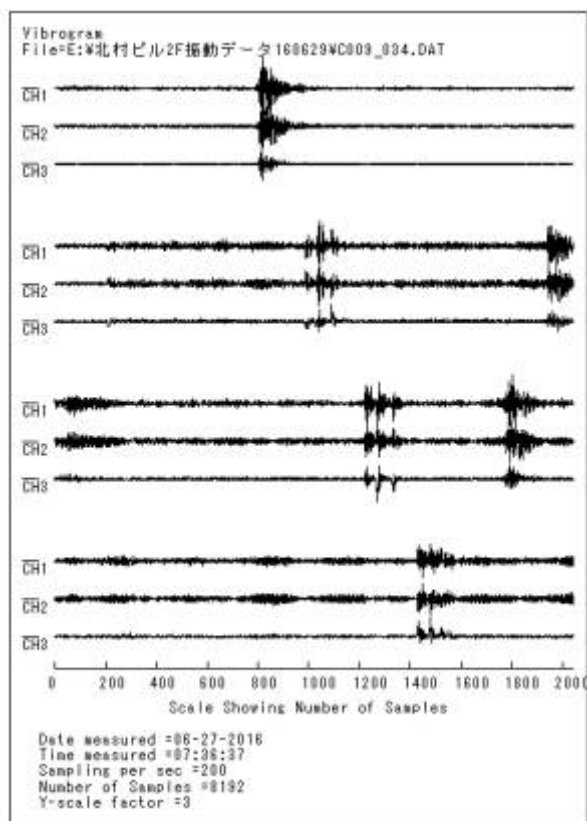


図 13. 朝のラッシュアワー時の振動記録

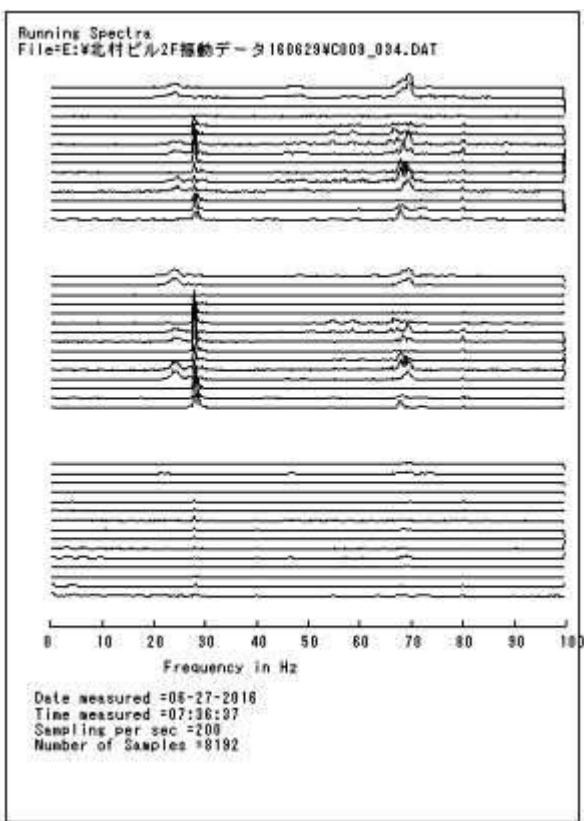


図 14. 左の振動から求めたランニングスペクトル

9.5 マンションの振動測定(常時微動による観察)

マンションにどれだけの耐震性があるかを、地震の来襲前に確認する具体的な測定方法は、現在までのところ、全く提案されていません。地震で被害を受けた場合、強度不足の原因を後知恵で論じることはできません。しかし、災害前に耐震補強工事の提案がされるとき、その論拠を、どこまで信頼してよいかは皆目分からないのが普通です。建物本体は眼でみて程々の丈夫さを判定できますが、実は地盤に問題があった、また、基礎工事に欠陥があった、のような眼に見えない要因でも、耐震性に差が出るのが知られるようになります。突発的に大きな地震が起きる前に、日常的に振動を体感できることもあります。前節で紹介した、交通量の多い道路沿いの建物がそうです。この節では、閑静な住宅環境にある建物での測定例を説明します。図15は、名古屋市東部の丘陵地に建てられたマンションです。周辺の道路は、大型車の通行がありません。しかし、加速度計の感度を上げると常時微動を検出することができます(図16)この図は、ゴミのような波形にしかみえませんが、それを解析に載せてランニングスペクトルを描かせると、卓越振動が二つあることが分かりました(図17)。

図15のマンションは東西に約100m あります。加速度計の向きは CH1 が南北方向、CH2 が東西方向、CH3が上下方向です。やや見難いのですが、東西方向の振動レベルは小さいことがはっきりと分かります。南北方向には、二つの卓越振動(6 Hz、12 Hz)があることが明瞭に分かります。常時微動は地盤から伝わってきますので、垂直方向の振動はランダムな傾向があることが読みとれますが、特に固有振動として指摘できる明瞭なピークはありません。



図15 六階建てのマンション

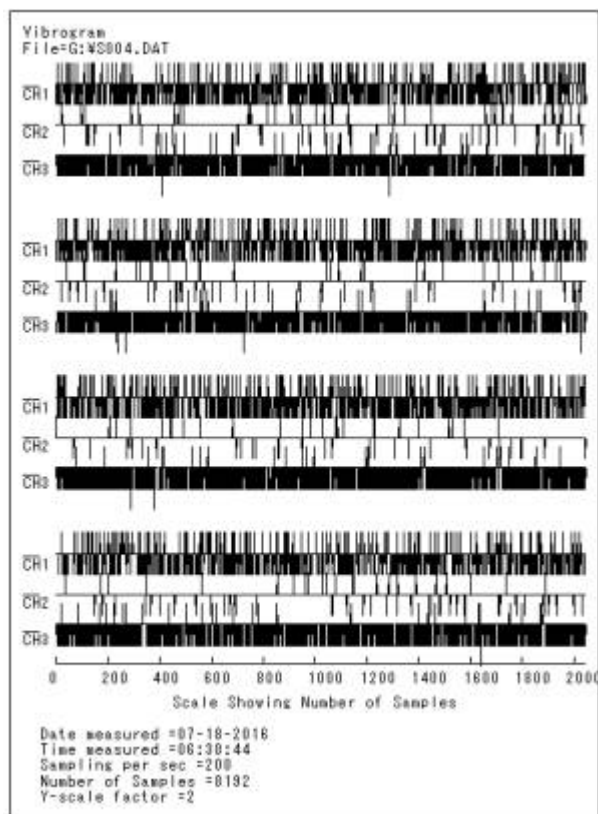


図16 マンション六階で計測した常時微動

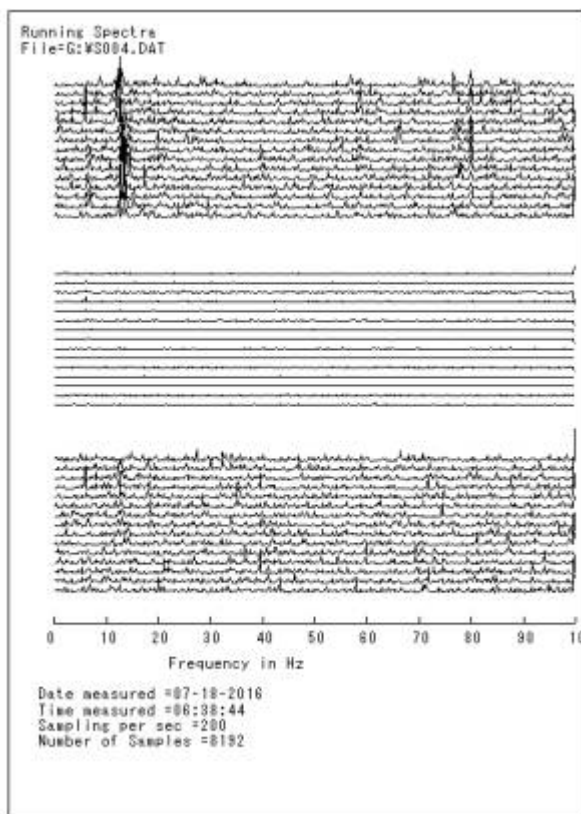


図17 ランニングスペクトル

おわりに

この報文では、構造物の振動測定のために持ち出して野外で作業をする振動測定システムの紹介をしました。それ以外のときは、倉庫で保存するのですが、これを、建物の耐震性を解析することに応用するとし、24時間観測待機をする実験を始めました。その場所として、島田自宅の六階建てマンション、それも、ベッドでモニタが観察できるように、パソコンと測定器とはサイドテーブルに載せてあります。加速度計センサは、邪魔にならないように、鴨居の上、コンクリートの壁に接して置いて、コードでつないであります(図19)。測定器は、常時通電して、パソコンのモニタで振動の監視ができます。ファイルへのデータ書き込みは、幾らか大きな振動を測定器のトリガが検出したとき、約40秒間を記録し、再び待機状態になるように設定してあります。ただし、パソコンは、測定データの確認のときだけに利用し、普段は電源を切っています。

自宅のあるマンションは、交通量の少ない閑静な丘陵地であるため、現在まで、常時微動による振動記録は全くありません。したがって有意な地震記録も未だ得られていません。たまたま、お隣さんが、釘を打つなどで壁を叩いたときの記録が残されている状態です。常時微動の振動レベルは非常に低いので、アンプの増幅率を上げて、マニュアルで測定器を起動させて観察したのが前節の例です。この振動が理論的なランダム波であることは、自己相関関数のグラフ(図18)で確認することができます。このグラフは、関数の始まりのところだけがピーク値であって、それ以外が、ほとんど0になっているからです。このような、一見ゴミのようなデータ記録であっても、ランニングスペクトル(図17)は、意義のある結果を表しているのが興味深いところです。マンションは南北方向に2つの卓越振動があります。二つあることは、一つは基礎にヒンジを仮定した曲げ振動、もう一つは高さ方向に剪断変形であろうと推定しました。詳しい測定をするには、許可を得た上で意図的に重量車をマンション周辺で走らせる必要があります。

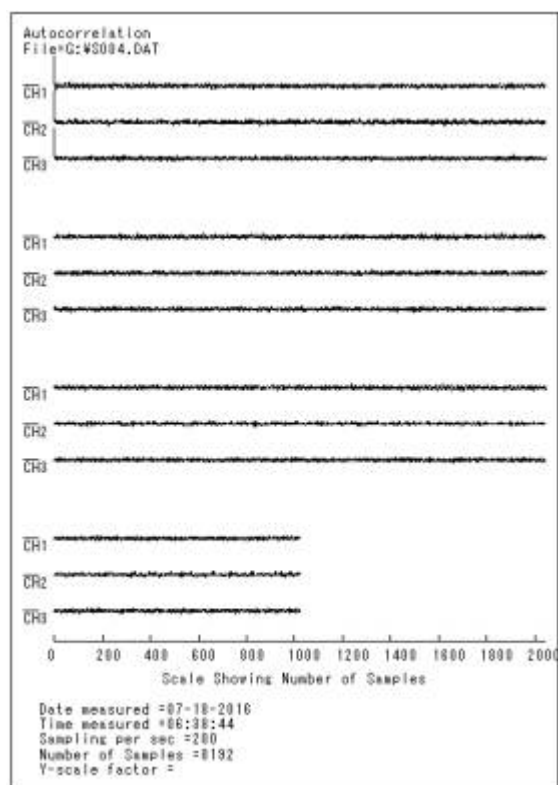


図18 常時微動の自己相関関数



図19 ベッド横のサイドテーブル上に置いたモニタ。下段にあるのが小型振動測定器本体です。加速度計は写っていませんが、壁に沿わせてあります。

以上