

振動測定による構造物診断システム

2008年11月版（初版2007年3月）

0. はじめに
1. 診断システムの考え方
2. 診断システムの構成

添付説明資料

- 付録A: 振動測定による構造物診断システムの仕様
- 付録B: 構造物診断システムで用いるパソコン及びソフトウェアの設定
- 付録C: 構造物診断システムで用いるデータ構造およびファイルの仕様
- 付録D: 現場測定時の作業手順
- 付録E: 構造物の現場振動測定ガイダンス
- 付録F: 構造物の振動解析の見方
- 付録G: 解析ソフトウェアのユーザインタフェース
- 付録H: 振動測定データの前処理プログラム DataPreViewerB
- 付録I: 衝撃加振試験データの解析プログラム ImpulseTesterB

参考文献

- チュートリアル資料「易しくない構造物の振動調査と診断法」島田静雄
雑誌「橋梁と都市 PROJECT」2006年1～12月号連載
<http://www.e-bridge.jp/eb/tcontents/yasasikunai-k/top.html>
- 振動測定による構造物診断システムの説明書
<http://www.nakanihon.co.jp/gijyutsu/vibrations/TApp0-D.pdf>

0. はじめに

「石橋を叩いて渡る」という諺があります。丈夫そうに見える石橋であっても、叩いて、振動の感触で安全を確かめ、慎重を期する形容として使います。この表現の裏には、二つの知識があります。一つは、石橋であっても振動すること、二つには、振動の具合で安全であることが経験的に分かることです。では、どの程度の振動の手応えであれば安全と判断できるかについて、具体的な目安を教えるはくれませんので、体験的に覚えます。ここで説明する「振動測定による構造物診断システム」（以降、単に診断システムと略記する）は、工学的な方法で橋の振動の手応えを求め、統計的知見と比較して健全度の推定を行う方法です。対象とする構造物の直接の耐荷力は、それを破壊させるまでの載荷試験を行わなければなりませんので、振動測定は非破壊試験に位置づけます。多くの振動測定の結果から得られる経験的・統計的な知見と比較して、相対的に対象構造物の健全度を推定します。振動問題は、専門ごとに興味の焦点が異なり、学問的にも奥行きが深い分野です。構造物、特に橋梁を対象としても、全国的に見れば橋梁数は何十万とありますので、個別の興味を捨象して標準化を考え、なるべく多くの振動測定を積み上げて、統計的知見を増やします。そのためには、振動測定から解析までの、首尾一貫したハード・ソフトの総合されたシステムが必要です。この解説書は、株式会社東京測器研究所製の歪みゲージ式加速度計を利用するシステム構成でまとめられています。他社の加速度計または速度計を利用する場合には、本システム構成を部分的に変更して利用することができます。個別の項目は、他の項目と密接な関連を持ちますので、標準化の提案を兼ねて仕様にまとめ、この本文の添付資料としました。それぞれについては、さらに詳しい説明書がありますが、それらを全部まとめると量が多すぎますので、別資料としました。

島田静雄

1. 診断システムの考え方

病院システムとの類似で理解する

人は、健康管理をしながら、それぞれの社会環境で仕事をしています。構造物、それも橋梁は重量交通に曝されますので、比喩的に言えば体力仕事をしてもらっています。人の場合と同じように、老齢化も進みます。設計荷重を超える重量車の通行は、耐荷力、いわば体力以上の仕事をさせられますので、不具合が蓄積、つまり疲労や劣化が進みます。人と同じように、日常的な健康管理に相当する点検業務は大切です。数ある構造物を毎日見て回ることではできませんので、何かの不具合を見つけた場合に、通報を受け付けて対策を扱う管理の窓口が必要です。人の場合は、本人が病院の受付窓口に行けますが、構造物は物を言いませんし、移動もできませんので、医者^の往診^{なみに}、担当者が現地に行って調べなければなりません。橋梁の診断は、医者^に相当する橋梁の専門家が当たるのが最善です。しかし、橋梁の絶対数は多く、相対的に専門家の数は非常に少ないので、一般の人でも使える簡単な計測器で事前の振動調査をしてもらい、それを基にして専門家が判断し、必要に応じてより詳しい診断と対策を考えるのが実践的です。病院の場合、診断は専門医師がするにしても、それ以外に、看護婦さんを始め、多くの手助けがあり、加えて、レントゲン撮影、血液検査などをする、多くの技能集団に支えられています。構造物の診断も、専門家と協力する技能集団の構想が必要です。この全体をシステムとして捉え、ハードウェア、ソフトウェア、それにヒューマンインタフェースである作業マニュアルなどで構成します。

人の健康診断との類似で理解する

人が自分で健康であると自負している場合には、健康診断のためにわざわざ病院に行くことはありません。しかし、健康であることを客観的に判断する自己のデータは、知っているのが最善です。日常的な健康診断は、簡単な測定と診察で済ませます。医師ならば、まず、眼で見て（視診）ある程度のことは類推します。体力の方は、運動能力・耐久力・抵抗力などの総合ですので健康が前提です。健康状態や体力は、血圧・体温などの基礎的な計測値を参考にします。人の体調は、本人が最も身体の状態を知っていますので、問診で本人からの聞き取りが有効です。基本的な診察手法は、人の場合、触ったり、聴診器で音を聴いたりする触診・叩診・聴診です。構造物の健康診断も似たような方法を取ります。構造物は物を言いませんので、現場の観察、つまり視診から始めます。実際に見た人から間接的に聞くこと（聞き取り）が問診に当たります。構造物の「触診・叩診・聴診」に位置づけるのが振動測定です。橋梁の場合には、通行車両による振動を体感できますが、建築物は、地震時以外は殆ど振動しませんので、振動させて診察する方法の実用化に難しいところがあります。構造物の振動を体感で診断するのは不正確ですので、振動計を使って物理的な測定をし、それを解析して判断に使います。この総合が診断システムです。診察データの判断は専門家が当たるのがよいのですが、一般の人でもある程度の判断ができるように、標準化とガイダンスが必要です。

診断は統計的なデータと比較して判断する

人が普通の健康体であると客観的に判断する方法は、多くの人の診断測定データとの相対的な比較であって、絶対評価ではありません。本人自身の診断データの履歴と比較することも相対評価の一つです。したがって、健康診断には、あらかじめ、なるべく多くの測定データを統計的に積み上げておきます。小学校などで行われている年一回の健康診断のような、数をこなす測定は、簡単に費用が掛からないようにし、データの整理も流れ作業に乗るような一般化・大衆化が最善です。個別の測定データが、統計的に得られたデータと比較してズレが大きいかが、病気であることが自明であると、そこで、やや詳しい診断が提案されます。研究目的の測定は、対象に偏りがあるのが普通ですし、設備も特殊になり易く、相対的に経費も高みます。構造物の健康診断も、考え方は同じです。通常の供用状態で、なるべく多くの構造物を対象とし、測定データを統計的に積み上げる診断システムを提案することです。一つの構造物であっても、以前の測定データを蓄積保存して比較に使うのも、統計的な処理の応用です。

特殊な構造物以外には点検専門の組織がないこと

橋梁をはじめ、大部分の構造物では、日常的な点検業務は、特殊な構造物の場合以外はしません。鉄道は特殊な閉じたシステムを構成していて、一般利用者が立ち入りませんので、保線や機材の修理点検に関する専門の技能集団があります。道路構造物は一般的な利用に供用されていますが、道路ごとに管理の窓口が分散していますので、横断的で統一の取れた点検専門のシステムを構築できないのが現実です。日常的に専門の技能集団を編成して巡回するのも無駄が多く、素人勉強で通り一遍の調査になり易いところがあります。検査用の自動車に測定装置を搭載して巡回するアイデアもありますが、鉄道とは違いがありますので、現状では具体的成果を収集する方法にはなりません。したがって、モニタリングの一つは、一般市民からの通報を積極的に活用することです。鉄道の場合、保線は作業部隊に編成した専門組織で行いますので、構造物の不具合などは保線が窓口になって情報が集まります。通報者は、運転士や車掌が多く、稀に一般からも入ります。鉄道橋では、構造的な欠陥で列車もろとも落橋した事故を聞きませんが、その前に、何かの異常音がする、などの通報があって、破壊による重大な崩壊事故の前に対策が取られた例が多いそうです。

カルテに相当する記録簿を作成すること

人が病院に診察に行くと、病院側は種々の資料を作成します。重要な資料が**カルテ**（ドイツ語）であって、個人の診察記録が医師によって書き込まれます。担当医が変わっても、カルテを見れば病歴などの情報が分かります。カルテは記録の追加がある資料です。構造物の診断の場合にも、統計的な資料との比較と同時に、その構造物の経年的な記録が残されていれば、過去のデータとの比較で疲労や劣化の判断に役立ちます。橋梁の場合には、管理者側で橋梁台帳を作成するのですが、これがカルテに当たります。保存の対象となる資料を**アーカイブ**(archives)と言うことが多くなりました。これは歴史として留める意義を持ち、必ずしも図書だけが対象ではありません。クラシック音楽に興味を持つ人ならば、ドイツ語読みのアルヒーブと説明すると納得してもらえます。アーカイブは、元資料が作成された日時で固定化され、内容の変更や追加が無い資料です。現在使用中の構造物について記録を保存したものはアーカイブではなくて、カルテと考えるのが良いでしょう。歴史に留めるような古い橋梁でも、現役で大事に使用しているのであれば、以前からの経過を記録したカルテが、いつでも見られるような資料管理をするべきでしょう。振動を測定して、それをカルテのような記録に残す習慣は、今まではありませんでした。振動調査だけの結果報告は、学術論文としてあまり高い評価をしませんでしたので、文献調査をしても、見つからないのが現実です。標準化した診断システムの利用と同時に、測定結果をどこかで集積してデータベース的な管理をすることも課題です。

データ量の爆発的な増加を抑える標準化

実際に振動測定から解析までの作業に当たると、多くの測定データを探りたくなります。その解析から報告作成の段階でも、付随して資料が大量に作成されます。これらの多くはコンピュータで処理されますのでファイルとして蓄積されます。測定点数が多くなると、流れ作業的にデータ処理を計画しなければ人手も時間も掛かります。測定段階のデータは、明らかに不必要なデータは削除しますが、後で役に立つかも知れないと、情の残るデータは保存したくなります。したがって、最初に得られる生の測定データは、データ量が嵩張らないファイル形式が最善です。生のデータは、全体波形が閲覧できるようなグラフィックス表現（バイプログラムやランニングスペクトルなど）にした二次的な資料を作成しておいて、それを見て詳細解析に載せるデータ箇所を選ぶようにします。

2. 診断システムの構成

システムとは要素の有機的な総合を言う

英語の system をカタカナ用語として使うシステムは、種々の意義を持っています。工学で使う場合には、多くの構成要素が互いに関連を持ちながら、全体として一つの機能を持つものを総称して言います。橋梁は、多くの構造部材を有機的に組み合わせて交通路を構成しますので、構造システムとする見方があります。診断システムは、考え方として、ハードウェア（加速度計、レコーダ、パソコンなど）、ソフトウェア（解析に用いるプログラム、説明書など）及びインタフェース（使い方や作業手順など）の組み合わせを考え、この総合で構造物の健全度の推定をするシステムとします。この構成を、やや具体的に示すと、次のようになります。

- 三成分加速度センサー式（歪みゲージ応用、圧電型など）
- 四成分レコーダー式（歪みゲージ制御、アンプ、電源装置などを含む）
- Windows パソコン一式（Excel, Word などのソフトとプリンタなどの周辺装置を含む）
- データ処理と解析ソフトウェア（診断システムに特化して開発）
- 測定実施要領書（測定作業から解析作業までの手引き）
- 個別の構成システムの仕様書、説明書など
- その他（チュートリアル・ガイダンス資料など）

加振方法が三通りあること

診断をするには、何らかの方法で構造物を振動させなければなりません。電気・機械装置では、それ自体が発振源であることも多いのですが、構造物の場合には外的な攪乱力による応答振動をします。攪乱力の種類として、三通りあります。起振機を使うのは橋梁振動試験では費用が嵩みます。自動車交通などを含め、日常的に観察できるランダムな攪乱力を利用するのが最も手軽ですので、この方法を主に提案します。叩いて起振させる衝撃試験があります。西瓜の熟れ具合を調べる、など日常的に行う検査法を工学的にまとめます。この方法は、床版・弦材・斜張橋のケーブルなど、相対的に局所的で小範囲の部材の検査に応用します。

診断の道具は加速度計とすること

橋梁は、構造物の中でも良く振動する性質を持ちます。橋梁設計では、間接的ですが、橋梁の振動レベルが大きくならないように、タワミを制限する基準が決められています。現実の橋梁の振動は、加速度レベルとして 0.02G 程度であって、大きい場合であっても 0.2G を超えることは、あまりありません。これは、地震の震度で言えば 1 ~ 2 程度です。そのため、構造物の振動測定は、地震計並の高感度のセンサーが必要ですので、専門的には、特殊でやや高価な設備を使います。歪み計の原理を応用する加速度計は、比較的安価で、取り扱いも簡単です。これは、感度の向きを垂直にすると重力の加速度 1G を計測することができます。しかし、0.02G のような低いレベルの振動を計測しようと感度を高めた加速度計を使うと、輸送や取り扱いのときに壊してしまう危険があります。そこで、安全のため、2G 以上の計測のできる容量の大きな加速度計を使い、アンプを始めとしたハードウェアと解析のソフトウェアの総合化されたシステムで、この弱点を補います。

三成分の同時測定を単位とすること

力学的に言うと、動的な現象は 6 成分あります。移動と回転であって、それぞれに空間的に 3 成分です。普通のセンサーは、一方向の移動成分を検出しますので、これを三つ組み合わせた 3 成分一体型の加速度計が便利で、これを使って、垂直方向と水平二方向の振動成分を同時計測することを一つの測定単位とし、3 成分をまとめて扱うように全体システムを標準構成します。現場でのセンサ設置の向きは、対象構造物の対称軸を考え、水平二成分を橋軸方向とそれと直角方向に合わせます。回転成分は、橋梁の場合、橋軸回りの捻れ振動が主な対象です。回転を検出する専用のセンサは、ジャイロコンパスを応用する、などの非常に特殊で高価なものになりますので、実践的には、加速度計を或る間隔で離して対に使い、振動データの和と差とをソフトウェア的に計算すれば、移動と回転とに分離することができます。この目的には、三成分一体型加速度計システムを複数台使い、場所を変えて設置し、独立に計測します。同時に記録されるタイム情報をもとにソフトウェア的に同期を取ります。しかし、一台のシステムであっても、場所を変えて測定することで、捻れ成分の振動を同定できることがあります。これは橋梁の専門家が全体結果を判断して行います。

ソフトウェアは基本的な処理に限定してあること

診断システムの構成では、パソコン（パーソナルコンピュータ）が陰に陽に使われています。パソコンの能力が飛躍的に上がり、従来の大型のコンピュータ（メインフレーム）と遜色無い機能になりましたので、研究機関の環境でなくても、一般ユーザでも高度の情報処理が可能になりました。しかし、処理の内容は専門的ですので、ソフトウェアは一般ユーザが扱い易いように、ブラックボックス化されず。現場にパソコンを持ち込んで作業をすることも可能ですが、作業性から見方からは、測定作業に専念するようにして、パソコンと繋がなければ処理ができないような構成を避けます。レコーダ類は内部にCPUが組み込まれていますが、そのソフトウェアは作業前にパソコンと接続して設定します。また測定終了後は、レコーダ側に組み込んだメモリのデータをパソコンに取り込んで解析します。診断システム側で準備した解析ソフトウェアは、基本的な機能に絞ってあります。解析の段階になると、多くの研究上の見方が入りますので、固定化した解析ソフトウェアでは満足しないユーザも多いと思います。興味の焦点が異なる解析ソフトウェアが別に幾つもあるのは当然です。また、外部記憶装置など、インタフェースに関連する周辺装置の開発は日進月歩の感がありますので、それに合わせるようにソフトウェアの中身も弾力的な対応が必要になっています。これらの情報開示の方法は別途考えることにしました。

解析結果の解釈には専門家の助言が必要

橋梁振動測定データの標準的な解析処理は、成分方向別の卓越振動を求めることに主目的を置きます。とりわけ、主構造の上下振動の固有振動数が重要です。この振動数 f Hz は支間 L m の平方根に比例する統計的な性質があって、設計基準のタワミ制限から決まります。その関係式は、タワミ制限が支間の $1/1000$ の場合には $f=16/L$ です。例えば、支間 100 m では $f=1.6$ Hz になります。この関係は、統計的な研究で、構造形式別に求まっていますが、第一義的に結果を判定するときに使うことができます。長さの長い橋梁では波動が折り返す性質も観察されます。この波動の速度は、音速 330 m/sec よりも低く、約 200 m/sec であることが多くの測定から統計的に確認されています。橋の長さを L (m) とすると、この長さを 1 往復するときの周期 T は $L/100$ 秒です。卓越振動数 f は、この逆数で $100/L$ ヘルツです（例えば $L=100$ m ならば 1 Hz です）。測定された振動数が相対的に大きめに得られれば健全、下回るようであれば剛性不足と判定します。振動測定は 3 成分得られますし、測定箇所を変えると別の結果も得られます。この全体から、測定対象橋梁のその他の力学的性質が分かります。この判定方法になると、橋梁の専門家の助言が必要です。総合的な判断には、測定結果を見易いグラフや数値に表しておきます。最も基礎的なグラフは、振動波形を生で観察するオシログラム（パイログラムと言う表現を使っています）。次いで、やや専門的になりますが相関グラフがあります。スペクトル図の形でグラフ化するのが、一般ユーザに馴染み易い表現方法です。しかし、ここで計算されるスペクトルは、光のスペクトルのような物理的な意義ではなく、振動の出易さを表す**確立分布**のグラフと解釈しなければなりません。と言うのは、構造物の振動は、通行する車両など、外部の攪乱力に引きずられる応答振動だからです。したがって、卓越振動はスペクトル図では尖鋭なピークではなく、或る山を描きます。山が急であるか、なだらかであるかを表すパラメータが**減衰係数**です。このことを考えて、卓越振動数を表す数値の精度は 2 桁程度に抑えて判断に利用します。

測定結果の情報を集めるデータセンタの構想

個別に測定したデータを判定するときには、類似した他の構造物のデータと比較ができるのが最善です。そのためには、どこかでデータサービスのできるセンタがあると助かります。このようなセンタは、言わばボランティア的な作業で始めなければなりません。インターネットが普及してきましたので、もしそのような箇所（サイト）があると、多くの利用者があると思います。同時に、自分の手持ちのデータを提供することで、データをさらに充実するように協力してもらって、データセンタを育てたいものです。

<=====>

振動測定による 構造物診断システムの仕様（案）

A0. はじめに

橋梁ならびに建築物を含め、構造物の非破壊検査の一つとして、構造物の振動を測定して、その力学的な性状を解析し診断する方法全体を、「振動測定による構造物診断システム」(以降、単に診断システムと略記する)として仕様にまとめます。「石橋を叩いて渡る」という諺にあるように、振動の手応えで安全を確認することは経験的な方法として知られています。この方法を実用的に実施するため、加速度計を使う振動測定に始まり、それをパソコンで解析するまで首尾一貫したハード・ソフトの総合された診断システムを提案します。この方法は、学問的には奥行きが深い課題ですが、ここでは、実用性を考えて、必要最小限の基本的な診断システムの仕様を提案します。専門的な見地からの仕様は種々考えられますが、一般の簡便利用を意図して仕様を限定しました。

A1. 一般

A1.1 診断システムの構成

診断システムは、主として橋梁構造物を測定対象として、以下のハードウェアおよびソフトウェア(プログラムおよび文書を含む)で構成します。

- 三成分加速度センサー式
- 四成分動ひずみレコーダ式(アンプ類、電源装置などを含む)
- Windows パソコン一式
- 解析ソフトウェア
- 測定実施要領書
- システム解説書
- その他(チュートリアル・ガイダンス資料など)

A1.2 振動計

振動計(センサ)は抵抗線歪み計応用の加速度型とし、垂直と水平二成分のセンサを一体化して取り扱いを単純化します。この型のセンサは、重力加速度のような、振動数 DC からの感度があるためです。測定周波数範囲は、対象が構造物であるので、DC-100Hz(サンプリング周期 0.005 秒)とします。速度型のセンサの方が振動測定には有利ですが、加速度型のセンサの方が軽量・小型になります。ただし、輸送などの際、受信部をロックする安全装置がないので、衝撃でセンサを破損させないように注意します。抵抗線歪み計に電源を供給し、出力を増幅するアンプとを含めて一式とします。アンプは電池駆動としますが、安定した電源バックアップは、自動車バッテリーまたは 100V 商用電源の利用を考えます。

A1.3 記録計

記録計(動ひずみレコーダ)は、三成分センサのアンプ出力を増幅し、AD 変換したデータと、タイム信号用に一成分を考えた四成分のデジタルレコーダとします。ハードウェア的には、センサのアンプと一体構成とします。データ記録媒体は、取り外し可能な大容量の外部メモリとし、パソコンに接続して解析します。

A1.4 パソコン

記録計の初期設定には、パソコンまたは小型の携帯情報端末(PDA)を利用します。現場の作業時には、これら無しでも測定が可能ですが、センサの設置確認並びに波形を観察するモニタとして使うとよいでしょう。従来、デスクトップ型のパソコンは、やや大型であり、100V の商用電源を必要としましたので、電池駆動の携帯情報端末(PDA)をコントローラに用いていました。モバイル型のパソコンが、現場でも便利に利用できるようになったことと、携帯情報端末(PDA)が生産打ち切りの動きがありますので、将来的にはパソコンが現場の作業と室内解析の両方で利用する方向で動いています。

A1.5 解析ソフトウェア

狭い意味でのソフトウェアはコンピュータプログラムのことを指します。これには、振動計・記録計を制御する目的のプログラムと、解析に使うプログラムとの区別があります。前者は測定器側寄りであるので、測定器構成の部品扱いとします。解析ソフトウェアは、まず、データロガーの記録媒体からデータを取り込み、データベース的な管理を行います。ここまでを解析の前処理です。ついで、加速度計三成分を並列に扱い、相関解析・スペクトル解析などをインタラクティブに処理し、これらを選択して報告書の原稿作成を行います。

A1.6 測定実施要領書など

振動測定の準備・実施・解析・結果報告の際に参照する書類を、一括して広い意味でソフトウェアと言います。これらは、標準化した仕様に加えて、対象構造物に固有する計画書、個別の測定報告書の書式などがあります。

A2. 計測機器

三成分計測システムの構成例を参考資料として下に示します。

表 A1： 三成分計測システムの構成（株式会社東京測器研究所の例）

番号	名称	カタログ番号	仕様	参考価格
	三軸加速度計	ARF-20A-T	延長コード 5m 先端コネクタ付き	150,000
	超小型動ひずみレコーダ	DC-104R	印加電圧標準 DC2V	398,000
	CF カード	同上付属	32MB	
	DC 電源ケーブル	同上付属	DC-104R の接続用	
	センサケーブル	同上付属		
	USB ケーブル	同上付属	PC と DC-104R 接続用	
	標準ソフトウェア DC-7104	同上付属	パソコンを使う場合のソフトウェア	
	バッテリーパック	BA-104		約 17,000
	AC アダプターセット	CR-1860		約 7,000
	携帯情報端末 PDA		ポケット PC (A1.4 の説明参照)	約 86,000
	PDA 用ソフトウェア	DC-7104pda	上記コントロール用	約 70,000
	キャリングケース	CA-10A		約 20,000
	設置治具一式		マグネットスタンドなど	約 9,000
	電池等			
	パソコン		Windows98SE 以降	
	動的計測ソフトウェア	DC-7630	データ管理ソフトウェア	98,000

【解説】

振動計測をしたいとして、費用を見積もるときの参考資料を表 1 にまとめました。抵抗線歪み計の原理を応用した加速度計（センサ）は、他の原理に基づくセンサに較べて、相対的に低価格であり、取り扱いが便利です。しかし、感度を上げた製品は衝撃に弱い欠点がありますので、予備的に複数組を準備しておくのがよいでしょう。経費の算定では半ば消耗品並に償却を考えます。歪み計は、電気的なブリッジ回路に構成して出力を得ますので、1 成分当たり一台のアンプを使います。この出力は、同じく 1 台の AD 変換器を介してデジタル記録します。これを 4 成分まとめたものが動ひずみレコーダです。この本体には特化した小型コンピュータを持ち、デジタル記録は小型のフラッシュメモリに記録されます。このコンピュータの初期化は、測定作業前にパソコンと接続して行いますので、その専用ソフトウェアが必要です。現場ではレコーダと加速度計だけで作業ができますが、簡易なモニタ機能と制御用に、パソコンか携帯情報端末（PDA）を使います。表 1 ではパソコンの価格は入れていません。



図 A1 : 三軸加速度計 ARF-20A-T



図 A2 : 超小型動ひずみレコーダ DC-104R



図 A3 : 携帯情報端末 (PDA) と共にキャリングケースに納めた一式

A3. 現場測定作業の要領

A3.1 測定作業の人員

振動測定は、一人で作業を実行することも可能ですが、安全管理上は二人でペアを組んで作業に当たるのが良いでしょう。センサの設置・コードの接続などの準備作業と、後片付けなどは協力して行います。測定の開始・停止は一人が当たり、もう一人は測定環境や測定状況を野帳に書き込むことに当たります。テープレコーダ式のデジタルレコーダが利用されていた時代は、音声によるモニタ録音も可能でしたので、それに代わる方法として野帳記録が必要です。歩道のある橋梁では、作業は歩道上で行うことができ、歩行者の邪魔をすることも殆どありません。歩道が無い場合には、車道の部分的な使用の許可を所轄警察署に願い出ると共に、安全管理者を決める、などの対応が必要です。

A3.2 センサ設置箇所

三成分センサは、上下および水平2方向の加速度を検出するので、橋梁における標準的な設置向きは、橋軸方向の水平動(Ch1)、橋軸直角方向の水平動(Ch2)、上下動(Ch3)に合わせます。その設置位置は、対象橋梁の振動性状を良く検知できる箇所を選びます。これを**主測定点**とします。この箇所の選定は、或る程度の専門的な判断を必要としますので、専門家の助言を得るのが望ましいでしょう。一般的に言えば、橋梁は、支間中央で鉛直方向の振動が大きく得られますので、ここを主測定点とします。しかし、例えば、歩道上にセンサを置くと、床版の局所的な振動が大きく得られて、本体構造の振動が隠されることもあります。そのため、設置箇所を変えて測定し、これら相互の結果を比較して、対象構造物の振動の全体像を同定します。この判断には専門家の経験的な知見を必要とします。三成分のセンサを使うことは、一箇所の測定であっても、成分間の振動性状の比較で振動性状の同定に役立てることができるからです。橋梁上部構造の振動性状を求める場合には、補助計測点として、下部構造である橋脚・橋台・地盤および周辺の建築物などを含めるのがよいでしょう。振動しないことを確認することも重要なデータになります。

A3.3 構造物の励振方法

橋梁は大きな構造物ですので、通常では体感できるほどの大きな振動を起こしません。振動は、主に橋梁上の通行車両によって励振されます。特に大型車両が通行すると振幅が大きく、解析し易いデータが得られます。交通量が少ない場合には特に重量車をチャーターして走行してもらう必要もあります。通常交通状態を見て、大型車が橋梁に進入してくるタイミングを計って測定する方法を勧めます。このようにして振動測定をすると、波形そのものはランダムですが、これをソフトウェアで統計解析することで有意な結果が得られます。励振方法として、特別な起振装置を使うこともありますが、測定作業全体が大掛かりになり、費用面でも嵩みます。歩道専用橋などは、人がジャンプすることで加振させます。床構造などの部分的な衝撃加振は、重錘落下装置(小型 FWD 試験装置)を応用することができます。

A3.4 計測継続時間

振動波形は、標準として、サンプリング周波数 200Hz(周期0.005 秒)でデジタル化され、その約 10 秒間を選んでスペクトル解析に載せます。このことを考慮して、測定は、約 40 秒を一単位の継続時間とするように作業し、測定終了後の解析の段階で、波形を見ながら 10 秒間の解析区間を切り出します。構造物の卓越振動は、確率的な性質があって、出たり出なかつたりする性質があります。また、構造物の固有振動モードで、振動の節(ふし)に当たる箇所ではその振動モードが計測に掛からないこともあります。アーチ系の橋梁では支間中央に節のある逆対称振動モードが卓越する傾向がありますので、さかのぼって、A3.2 で説明したセンサ設置箇所の選択のときに、支間 1/4 点での測定を加えておく、などの注意が必要になります。解析区間を切り出す時間範囲次第と測定箇所次第で、卓越振動を拾うことに失敗することもあります。(この判断は解析ソフトウェアを運用するときに説明します。)

A3.5 データ管理

測定データは、レコーダに挿入設置したフラッシュメモリ(CF カード 32MB 標準)に、シリーズ番号が自動的に振られてファイル化されます。解析作業は、CF カードのファイルをパソコンのメモリに取り込んで行いますので、このファイル全体を一つのフォルダにまとめ、作業名などの分かるフォルダ名を付けます。測定データのファイル名は、測定対象や測定点の名称などの**測定時情報**を持たないので、2.1 項で説明した野帳の記録を元に、ファイル名と測定時情報との対応表を作成します。

A4. 振動データ解析作業と結果の解釈

A4.1 解析の目標

データ解析の主な目的は、卓越振動数を求めることです。力学的に見れば、橋梁の固有振動は無限に多く解析されますが、現実の構造物で発現するのは、そのうちの限られた個数です。特に上下動に注目すれば対象橋梁の剛性を他の橋梁のデータと比較することができます。しかしながら、上下動だけでなく、水平方向の振動、捻れを伴う振動などの区別があり、また振動モードと次数などの解釈をしなければなりません。これらを総合的に解釈するには、橋梁の専門家の判断を必要とします。

A4.2 パソコンとOS

解析作業に用いるハードウェアは、Windows 系のパーソナルコンピュータ（パソコン）の使用を前提としています。OSバージョンの相違は、ソフトウェアの動作に微妙に影響します。MS-Office系列のExcel、Wordなどは、バージョン変更に対応することができます。現時点の解析用ソフトウェアは、Visual Basic 6.0 で組んでありますので、これが機能する環境に合わせるように、追加のDLLなどをインストールする必要があることがあります。

A4.3 周辺機器とのインタフェース

プリンタ・ディスク装置などの周辺機器との接続を別として、一般的な周辺機器とのインタフェースはUSB(universal serial bus)を使用します。パソコンから見れば、小型歪みレコーダも周辺機器の一種であって、間接的にCFカード(小型のフラッシュメモリ;書き込み読み出しのできるメモリ)のファイルを利用します。USBケーブルで接続しても、ファイルの読み出しには、測定作業に用いる専用のソフトウェア(DC7104)が必要です。CFカード単独のインタフェース(コネクタ仕様)がUSBではないので、レコーダからCFカードを取り出して、独立に別のパソコンでファイルを読むためには、読み出し用のインタフェース(コネクタ仕様)が別途必要です。この解決は、計測用ソフトウェアを介して取り込んだファイルを、別のUSB仕様のフラッシュメモリに写すか、メール機能を使って転送します。

A4.4 作業単位とファイルの種類

構造物の振動現象を、同時三成分の加速度計によって現場で記録する一単位の作業は、レコーダ操作上の単位を指し、レコーダ記録ボタンでの開始から停止までです。これを**測定単位**と呼びます。レコーダは、一定長さ単位でファイルに区切って自動的にフラッシュメモリに連続的に書き込まれます。この場合のファイル名は、全体の測定単位を通したシリーズ番号が自動的に付与されます。このファイルを**データファイル(*.DAT)**と呼びます。1測定単位は、論理的に連続する複数データファイルのシリーズで記録されます。データ処理上の作業単位は、この1データファイルごとに独立した扱いとします。データファイルはバイナリーデータの並びですので、測定条件と設定を記録したテキストファイルが、データファイルと対を構成するように、同時に自動作成されます。これを**ヘッダーファイル(*.HED)**と呼びます。データファイルはバイナリーファイルですので、これをEXCELで処理できるような**解析作業用ファイル(*.CSV)**に編集することもできます。ただし、ファイルの寸法がデータファイルの3倍以上に膨れ上がります。

A4.4 データの前処理

測定データは、質の良し悪しに関わらず、逐次、CFカードに記録されます。一連の測定作業が終了した時点で、全体を見直して、明らかに失敗であるデータを除くなどの判断をしたいとします。従来、この判断には、振動波形のオッシログラムを利用するので、デジタル化したデータの場合にも、同質のグラフ(**パイログラム**)を作図します。波形を観察すれば、どの時間区間が解析に利用できるかについて或る程度の判断ができます。しかし、橋梁の振動波形は、外見的にはランダム波形ですので、その波形が解析に適しているかどうかの判断を立て難いところがあります。その判断を補うため、スペクトルの時間的な変動が分かる**ランニングスペクトル**を併用します。構造物の卓越振動は確率的な性質があって、時間的に出たり出なかつたりしますので、解析区間の選定次第では卓越振動の同定に失敗することが起こります。上記の二種類のグラフと数値リストを見れば、振動結果の速報的なレポートを作成できます。この処理に使うソフトウェアとして **DataPreViewer** を準備しました。

A4.5 解析処理

より詳細解析に使うソフトウェアは TimeProcess を使うことができます。また、衝撃試験はサンプリング周波数を 1K に設定して数秒のデータを扱いようにし、ソフトウェアには ImpulseTester が用意してあります。

A4.6 データ管理

振動データの測定から解析までには多くのファイルが利用されます。ヘッダーファイルとデータファイルのファイル名は、ハードウェアが自動生成します。また、解析作業用ファイルのファイル名も自動生成の対象です。したがって、多くの異なる測定作業間では同名のファイルが作成されますので、この仕分けのために、フォルダ名を階層的に使って、フォルダ単位での管理をします。ファイルの中身は数値の集合ですので、ファイル名とデータタイトルなどの情報リストの他に、バイプログラム・ランニングスペクトル・モニタグラフを、管理用資料として利用します。このグラフには、フォルダ名・ファイル名・測定日時などを書き込むようにしてあります。

A4.7 解析結果の解釈

構造物の振動解析において、固有振動数のスペクトル分布のグラフは、光学的なスペクトル図のような物理的な意義がありません。構造物は、電気・機械装置などの振動現象とは異なって、構造物自身が振動の発生源ではなく、外部の攪乱力に引きずられて振動する応答振動です。振動のセンサも一つの力学系であって、攪乱力によって応答振動をします。センサの場合には、明確な共振が出ないように製作されていますので記録計になるのです。構造物の振動スペクトルも統計的な確率分布の性質を持ち、攪乱力に引きずられますので、振動数に揺れがあるのが普通です。スペクトルは尖鋭なピークで得られるのではなく、全体として山を持ちます。山が緩やかであるか急であるかを表すパラメータが減衰係数です。このことを考慮して、卓越振動数の精度は、数値計算で得られた桁数の多い数値そのものではなく、2～3桁に丸めます。減衰係数も2桁程度の表示に抑えます。構造物の上部構の振動特性は、それが立地する地盤・基礎の性質と関わります。上部構が幾何学的に同形式であっても場所ごとに異なる性質を示します。このことを考慮して、地盤・基礎の振動も測定しておくことを勧めます。これらのデータは、その時点で無理に説明を考えるのではなく、参考として付記するのが望ましいでしょう。

A4.8 簡易な診断法

振動する力学系は、対象が何であっても、共通した性質があります。それは、自分の重さ(質量 $M \times$ 重力加速度 g)の力で変位する大きさ y が計算できれば、 y が振動数 f の2乗に反比例します。その関係は、約 $y=1/4f^2$ です。振動周期 T を使うと、 $y=0.25T^2$ です。数値的性質を言えば、周期1秒の振動は静的な変位で約25cm、2秒で1m、0.1秒(10Hz)で2.5mmです。この性質は垂直・水平の振動向きとは関係しません。単純橋梁の振動では、支間の半分の重量が支間中央に集中している動力学モデルで計算すると実際に良く表します。橋梁の場合には、設計時にタワミ制限があつて、自重+活荷重によるタワミを支間の1000分の1にする、などと決めますので、固有振動数 f が支間 L の平方根に逆比例する統計的な性質があります。この関係は、タワミ制限が $L/2000$ の場合、 $f=22/L$ 、 $L/500$ では $f=11/L$ になります。測定された振動数をこの理論値と比較し、振動数が高ければ剛性が高いと判定し、低ければ剛性が不足し、耐荷力に問題がある、と判定することができます。建築構造の場合は上下動ではなく水平方向の振動を問題にしますが、これにも統計的な性質が知られていて、振動周期が建物の高さに比例します。鉄筋コンクリート造では $T=0.02H$ 、鉄骨構造では $T=0.03H$ です(望月 重による)。これらの関係は、少ない測定データから得られていますので、多くの測定を積み重ねることで、具体的な性質が明らかになると期待しています。

<----->

構造物診断システムで用いる パソコン及びソフトウェアの設定

B0. あらまし

二種類の準備設定があること

構造物の振動を測定して、その力学的な性状を解析したいと計画するとき、そもそもの始めは、加速度計・レコーダ・パソコン、などの準備から始めます。新しく全体を購入するか、リースなどで利用するか、手持ちの設備を利用するか、などによって手順が変わりますが、基本的な作業は、全くの処女設備をまとめて、システムに組立てることに始まります。これを第一段階の設定とします。第二段階は、実際の測定作業に合わせて、パラメータの確認や再設定を行う作業です。振動測定は現場作業が普通ですので、測定時に細かな設定作業に手を掛けないようにします。第一段階の設定は、設備や装置のメーカーが提供するマニュアルに拠らなければなりません。しかし、その内容は、あらゆる場面を網羅するように総花的まとめてありますので、詳細になり、分量が嵩み、目的とする事項を参照したいときに手間が掛かる欠点があります。測定と解析作業は、殆どがパソコンで管理されますが、現場と室内とではパソコンの作業環境も異なり、また、必ずしも同じパソコンを利用するとは限りません。ここでは、パソコン側に立った視点で設定作業を行うことを解説します。

全体の環境をまず理解する

構造物の診断システムは、加速度計とそのレコーダが主役のハードウェアです。レコーダの初期化はパソコンに接続して行います。パソコンはユーザ側で準備します。ただし、商用電源が無い現場での利用を考えて、簡易情報端末 PDA(ポケットコンピュータを利用した装置)と接続する方法を、オプションとして準備してあります。パソコンから見ると、レコーダは、記録媒体(フラッシュメモリ)を持つ外部デバイスの一つですので、パソコンとレコーダ間のインタフェースを、あらかじめ設定(セットアップとも言う)しておきます。このセットアップに関連する事項は、次の項目です。

- (1) 動ひずみレコーダ DC-104R 一式(パソコン側から見た外部デバイス)
- (2) パソコン一式
- (3) レコーダ制御用ソフトウェア(DC-7104.exe)
- (4) デバイスドライバ(レコーダとのインタフェース)
- (5) データ解析用ソフトウェア(DC-7630.exe、ほか、ユーザ開発ソフトなども含める)
- (6) 簡易情報端末 PDA(オプション)およびその制御用ソフトウェア(DC-7630pda.exe)

簡易情報端末 PDA は電池駆動のパソコンの意義があること

レコーダは、単独に電池で駆動できるように設計されたデバイスですが、測定開始前にパソコンと接続して、初期設定が必要です。デスクトップ型のパソコンは、AC 電源を利用するのが標準でしたので、AC 電源の利用ができない測定現場を考慮して、レコーダはパソコンと切り離して単独でも利用できるように設計されています。しかし、現場で設定を変更したい場合もありますので、電池駆動のポケットコンピュータと接続して設定する手段がオプションとして準備されています。これが簡易情報端末 PDA です。これも、レコーダとのインタフェースを取るためにソフトウェアをインストールしなければなりません。しかしながら、電池駆動の小型モバイルパソコンも利用できるようになってきましたので、将来的には PDA を利用しない方向に向かっていきます。

測定と解析専用パソコンをシステム化すること

汎用のパソコン(パーソナルコンピュータ)は、多くのユーザに迎合して多様な機能を持つように肥大化する傾向があります。しかし、振動の測定と解析作業には、余分な機能を除いて、専用パソコンとして特化する使い方が考えられます。ソフトウェアのプロテクトキーであるハスプ・キー(hasp)は、当該のパソコンを専用化する一つの手段です。また、測定現場に持ち出すパソコンは、データ解析を目的として室内で使うパソコンとは、別とするのもよいでしょう。これらのパソコンは、外付けのハードディスクなどを介して、関連するソフトウェアとデータを共有し、集中管理する方法を考えます。

B1. パソコンの環境設定

Windows の動作環境を確認する

一般ユーザがレコーダと接続して利用するパソコンは、Microsoft 社の OS である Windows を搭載したものに限られます。ただし、レコーダ制御用ソフトウェアが支障なく機能するために、Windows のバージョン及びパソコンのハードウェア環境について確認が必要です。これは、ソフトウェアの開発時におけるプログラミング言語のバージョンなどが関係するからです。

- OS : Windows 98SE, Windows Me, Windows 2000, Windows XP
- 外部インタフェース : USB インタフェース。ハードディスクなどは内蔵標準装備でよい
- モニタ : 1024 × 768 ドット以上推奨

インタフェースはデバイスとの接続が原義

パソコンは、ユーザの多様な要求を満たすように開発され発展してきていますが、その構成を大きく分けて、ハードウェアとソフトウェアに切り分けます。その全体を管理するのが OS (operating system) と呼ばれるソフトウェアです。パソコンの心臓部は電気電子装置の CPU であり、その動作を支える内部メモリを持っています。この部分以外は、総て外部装置 (デバイス) 扱いであって、選択的に追加されます。これらは、専用のコネクタとケーブルで接続されますが、最初から内部的に接続されている場合もあります。この接続全体を総括して インタフェース という用語で表します。基本的な外部装置はキーボードとモニタです。外部記憶装置もほぼ必須であって、記憶媒体としてフロッピーディスク、ハードディスク、MO, CD, さらにフラッシュメモリのように多彩になりました。これらの外部装置個別に専用のコネクタなどが使われていますが、これらの共通化が図られるようになってきました。その一つが USB です。パソコンは小型化が進み、ノートパソコンでは高張る外部装置を本体から外し、必要なときに USB を介して接続するようになってきました。パソコンを操作するのは人です。この操作法にインタフェースの概念を当てた用語が ユーザインタフェース であって、CUI と GUI などと使われています。操作法の解説は、解析ソフトウェア別にまとめます。

ソフトウェアのインストール

Windows の環境で走らせるソフトウェアは、実行時に Windows の OS がサポートする多くの機能を利用しています。したがって、例えば、モニタ上のフォームのデザインなどは、バージョンによって少しずつ差があります。この他に、実行時に呼び出し専用のソフトウェア (DLL) を使うことがあります。そのこともあって、実行形式のソフトウェアは単独で走らないことも起こります。実行を保証するために インストール 作業を必要とするのは、この理由からです。また、不要になったソフトウェアを削除するときも、Windows のアンインストールの手順に従うのが安全です。専用の DLL も削除するべきですが、同じ DLL を別のソフトウェアで共用している可能性もありますので、不用意に削除できないことがあります。Windows は、バージョンの改訂ごとにその中身は肥大化し、大量のソフトウェアをパソコン一台に抱えています。パソコンの価格も下がってきているので、不要なソフトウェアを削除するか、インストールしないで、測定と解析とに別々のパソコンを専用にあてがう方法を奨めます。これは、安全対策の一つです。

デバイスドライバ

外部記憶装置を利用するとき、装置のメーカーや動作方式が異なっても、ファイルやフォルダは、プログラム側から見て、論理的に同じ扱いができるようにしたいとします。そのソフトウェア対策として、ユーザのプログラムと外部装置との中間に、デバイスドライバ を介してアクセスします。デバイスドライバもソフトウェアですが、装置ごとに準備してインストールしなければなりません。ただし、デバイスドライバはハードウェアのメーカー側で準備するものです。レコーダも外部装置ですので、専用のデバイスドライバを必要とし、複数のレコーダを接続する場合には、同じ数のデバイスドライバをインストールします。このデバイスドライバは、レコーダ制御用ソフトウェアで専用されます。

B2. レコーダの設定

室内作業の感覚とは異なること

橋梁構造物を対象とした振動測定は、室内作業と較べれば良い環境でないのが一つの制約です。超小型動ひずみレコーダ DC-104R（単にレコーダと呼ぶ）は、計測システム全体の小型化と共に、室外作業の便が考慮されています。測定車にレコーダとパソコンを置き、加速度計から、延長コードを延ばして測定車に引き込めれば、室内作業に準じた環境も可能ですが、それは例外と考えるべきです。AC 電源が利用できない測定環境では、小寸法のノート型パソコンは、手袋をした状態での繊細な操作に向きません。また、モニタの画面も見難くなります。これには、明るさが不足することと、多くの機能を小さな表示画面に欲張って表示するような、ソフトウェア設計上の感覚の相違も関係します。したがって、測定時に利用するソフトウェアは、現場状況を勘案するようなバージョンの改訂が、今後も図られると考えてよいでしょう。

加速度計制御用アンプの機能も持つこと

振動計には種々の種類がある。電気的に見たシステムは、振動を電気信号（アナログ量）で得ること、それを増幅するアンプを持つこと、そして記録と再現（レコードとプレイバック）ができること、で構成されます。ここでの振動計測で用いる受感部（センサー）は、歪みゲージを応用する加速度計です。このセンサーは、単独では電気信号が得られませんので、ブリッジ回路に印加電圧を加え、ブリッジの初期バランス取り、そこからの電圧変動を増幅して信号を得る専用アンプを必要とします。このアンプはセンサー 1 成分ごとに必要です。電気信号の記録と再現には、従来、磁気テープを使うデジタルレコーダ方式でした。大容量の記憶装置（メモリ）が利用できるようになって、アナログ信号を変換してデジタルデータで記録する方式が主流となりました。レコーダは、歪みゲージ用アンプ・AD 変換器・デジタルレコーダ・外部メモリ装置を加えて、4 成分一体型で製品化されています。多くの成分の振動計測は、このレコーダ単位で増設します。

初期設定は内蔵電池の充電から始める

レコーダ単独は、電源を外部から供給するようになっています。レコーダ側には、通電を表示する LED 表示はありますが、電源スイッチを持たず、power コネクタを介して、バッテリーパックまたは AC アダプタと接続して使用します。レコーダは、測定時に、あらかじめ設定した日付・時刻などを含む情報を利用しますが、電源ケーブルを外しても、その情報を内部メモリ (RAM) に保存するように、バックアップ用内蔵電池を持っています。この電池は、レコーダの通電状態で充電されます。0 からフル充電には約 12 時間を必要としますので、加速度計を接続しない状態で AC 電源アダプタから通電して充電します。通電しない状態が一週間以上ある場合には、設定の再確認作業を兼ねて、補充の充電時間を見込みます。

測定条件の設定は加速度計とパソコンとを接続する

レコーダは、測定作業に先だって、パソコンと接続して種々の測定時条件を設定します。測定作業の実際では、パソコンの接続なしでも、前面のキースイッチ一つで、start/stop/balance の操作ができます。パソコンと接続して測定作業をすることの主な目的は、測定データ波形をリアルタイムで確認することにあります。測定条件を途中で変更することや、時間的に余裕があれば、データを読み返して波形の確認やスペクトル解析などをその場で行うこともできます。しかし、現場では測定作業に専念するのがよいでしょう。

測定前の設定項目

レコーダは、記録用 CF カードを挿入し、測定時に使用する加速度計と接続し、プログラム（レコーダ制御用ソフトウェア DC-7104.exe）をインストールしたパソコンと USB ケーブルで接続した状態にして設定を行います。プログラムを立上げると、レコーダの認識と、レコーダ内蔵の日付・時刻の確認をする初期画面が表示されます。必要があれば、日付・時刻を再設定します。なお、日付・時刻の設定は、【設定】メニュー 【日付・時刻設定】サブメニューを選択することでも行うことができます。この再設定は、パソコン側の日付・時刻に合わせるもので、遡って、パソコン側の日付・時刻は、例えば、117 番で較正しておきます。この確認が済めば、プログラムの作業メニュー画面が表示されます。メニュー方式は、ランダムに項目を選択できる便利さの反面、作業をどの順に進めるかの提案に欠けますので、設定の順番と設定定数の選び方を、次項で具体的に示します。

レコーダの設定細項目

レコーダの設定は、プログラム(レコーダ制御用ソフトウェア DC-7104.exe)の実行画面で行います。設定作業の説明は、プログラムの操作手順の解説でもあるので、詳しくは DC-7104 取扱説明書の第 5 章を参照します。下記の項目設定は、【設定】メニュー 【測定条件設定】サブメニューを選択することで開くダイアログボックスで行います。機能としては重複しますが、ツールバーの【設定】をクリックしてもダイアログボックスが開きます。なお、CF カードのクリアは、【その他】メニュー 【コンパクトフラッシュの初期化】サブメニューで行います。ツールバーの【File クリア】ボタンで行うこともできます。念の為、上の節で説明した初期設定を含め、橋梁振動測定の場合の設定データ項目を下に箇条書で示します。

- | | |
|------------------|------------------------------|
| (1) 日付・時刻 | パソコンに合わせる(プログラム立ち上げ時でも設定できる) |
| (2) 使用チャンネル数: | 4(第 1~3 まで使用する。第 4 は予備とする) |
| (3) 加速度計レンジ: | (加速度計ごとに添付される成績表を参照して選択する) |
| (4) フィルタ: | 100Hz |
| (5) バランス: | ON |
| (6) トリガ設定: | FREE RUN |
| (7) サンプリング速度: | 5ms(200Hz) |
| (8) データサイズ: | 8K(8192) |
| (8) 単位系: | m/s ² (加速度) |
| (9) 変換係数(スロープ): | (加速度計添付の成績表を参照して記入する) |
| (10) CF カードのクリア: | (フォーマットを行うと、以前の記録は消える) |

レコーダの設定項目の確認

設定状態は、【その他】メニュー 【設定状態の確認】サブメニューを選択するか、または、ツールバーのリストボタンのクリックで表示されるリストを見て確認します。設定変更をする場合には、前項の作業画面に戻って設定をし直します。設定確認が済んだレコーダは、パソコンとの接続を外しても測定作業を行うことができます。

B3. 簡易情報端末 PDA の利用(オプション)

現場測定専用のコンピュータであること

通常のデスクトップ型のパソコンは AC 電源を必要としますので、AC 電源が利用できない現場で、レコーダ単体の制御専用として簡易情報端末 PDA(以降 PDA と略記)が準備されています。PDA 本体は、小型のポケットコンピュータ(通称ポケコン)であって、下記製品が対応しています。レコーダとのインターフェースを取るため、コネクタを付したケースに納めた状態で利用し、この全体を PDA と呼びます。

- CASIO 製 CASSIOPEIA E-2000 Pocket PC 2002
- TOSHIBA 製 GENIO e 550G シリーズ Pocket PC 2002, 2003
- MITAC 製 Mio558 Pocket PC 2003
- TOSHIBA 製 GENIO e 830 Pocket PC 2003

ソフトウェアのインストール

ポケコンは、レコーダ制御専用として利用するためのソフトウェア: DC-104R ポケットコントローラ(DC-7104pda.exe)をインストールしなければなりません。このソフトウェアは SD カードに納められ、PDA の付属品として、取扱説明書と共に添付されます。インストールおよびレコーダ設定などの手順の詳細は取扱説明書を参照して下さい。なお、ポケコン本体については、前記メーカーが提供する取扱説明書を参照して下さい。

レコーダの設定

レコーダの設定細項目とそれらの内容は、前節 B2 で解説した 10 項目と、ほぼ同じです。ただし、レコーダの設定は PDA から可能ですが、パソコンの方で設定を済ませておくのがよいでしょう。PDA は小さいながらもモニタ画面を持つので、主な利用方法は現場測定でのレコーダの start/stop/balance 制御と、振動波形のモニタリングです。

<----->

構造物診断システムで用いる データ構造およびファイルの仕様

C0. あらまし

仕様を決める目的

振動現象の測定から解析までの作業は、直接・間接にコンピュータを利用し、大量のデータを扱います。その起点となるデータは、振動計のアナログ出力を計測器側でデジタル化したファイルです。これは計測器寄りのデータ構造を持ち、言わば生データです。これを EXCEL などで利用できるように汎用の解析に向くようにデータ変換をすることも考えておく必要があります。測定時情報などを加え、データベース的に原資料化し、種々の解析利用に備えたいとします。振動解析は、専門ごとに利用目的があり、データ採取の要望も異なります。ここでの仕様は、主として、橋梁構造物を対象とした診断システムに利用するように限定した提案です。ここでの診断システムに用いる計測器は、株式会社東京測器研究所の動ひずみレコーダ(DC-104R)を利用するように特化してあります。研究を目的とする場合には、視点を固定しないで種々の計測器とデータ構造を扱いますが、ここでは限定したファイル仕様を提案します。このようにすることの目的は、解析ソフトウェアをプログラミングする場合、ファイル構造の相違によって、その都度プログラムのソースコードを変更する煩わしさを避け、標準化したソフトウェアをサービスすることにあります。

三種類のファイルを扱う

構造物の振動現象を、現場でデジタル記録し、そのデータを解析に載せる前段階までの予備的な作業には、三種類のファイルを扱います。その名称を、下のようにする。括弧書きは拡張子を示す。

データファイル(*.dat)

ヘッダーファイル(*.hed)

解析作業用ファイル(*.csv)

前二つは、レコーダのハードウェア寄りの仕様で設計されていて、やや専門的です。データ解析に利用するには、一般ユーザが Windows 系パソコンで扱うことができるようなファイル構造に変換する必要があります。これが 解析作業用ファイルです。Windows 系パソコンの環境では、EXCEL で読めるテキストファイル形式 (*.csv) にファイル変換をしておくのが便利です。ただし、実際に測定から解析までの作業を経験してみると、このファイルを作成するとファイルの量が一挙に3倍に増えます。最初の二つの生データを直接読んで解析するようにしますと、データ変換に余分な作業と余分なファイルが必要でなくなります。解析に使うソフトウェアは、生のバイナリーデータをそのまま読んで利用するバージョンを提供しています。ソフトウェア名の末尾に B が付いているのがそうです。データ解析は、報告書などに利用する目的を持って種々の派生的なグラフィックスファイルとプリンタ用テキストファイルを出力します。

C1. データファイル(*.dat)のデータ構造

レコーダの設定で決まる仕様

橋梁の振動は、機械装置などの振動に較べれば低い周波数領域にあって、DC～100Hz 程度を考えれば十分です。地盤の卓越周期（振動数の逆数）では3～5秒の長周期が報告されることもあります。橋梁振動では音としての低周波振動が注目されることがあり、周波数領域としては10～30Hzです。これは派生的に空気振動として測定に掛かることがあります。機械振動では、例えば自動車エンジンの毎分回転数6000RPMは100Hzに相当し、橋梁振動よりも平均して高い周波数が注目されます。電気機械では、商用電源50/60Hzの交流が、その倍の100/120Hzのハムとして体験されます。これらのことを考慮して、レコーダ単独の標準設定値を下のようによつて決めます。これらの値は、ヘッダーファイルに記録されます。

- (1) 同時記録成分数： 4（水平動2成分、鉛直1成分、残り1成分は予備とする）
- (2) サンプリング周期： 0.005秒（サンプリング周波数200Hz）
- (3) データサイズ： 8K(8192)（約40秒）
- (4) ローパスフィルタ： 100Hz
- (5) トリガー： FREERUN（手動でstart/stopさせる）
- (6) 較正係数： SLOPE（測定値加速度計ごとに異なる）
- (7) 一データファイルの寸法： 2バイト整数×8K×4成分=64K

複数のレコーダの同期

構造物の振動現象を記録する標準のハードウェアは、3成分一体型の加速度計と、そのデータを記録する4成分一体型レコーダおよび電源部分とで最小構成（ユニット）とします。複数の測定箇所の測定は、原則として1ユニットを持ち回って作業します。複数の測定箇所を同時測定したい場合は、複数のユニット（8ユニット、32成分以内）を準備すると共に、全体をパソコンで制御することができます。その方法以外に、個別のユニット単位で独立に測定作業を行い、そのタイマの記録をもとに、解析時にソフトウェア的に同期を整合させることも考えられます。

一回の計測継続時間は標準40秒最低で約10秒とする

橋梁は、それ自体が振動源ではなく、通過する車両などで加振される応答振動です。橋梁本体には構造的に無限に多くの固有振動の性質を持ちますが、この発現には確率的な性質があって、出たり出なったりします。測定にかかる固有振動の方を卓越振動と言います。そのため、橋梁振動は、車両が橋梁に進入して通過する時間を継続して測定し、その波形を観察して有意なデータを含む時間間隔を解析に当てます。車両の速度を仮に10m/sec(時速36K/h)とすると、長さが200mの橋長を通過する時間は約20秒です。現場では、この前後に余裕時間を足して、約40秒を一回の計測継続時間（測定単位）とします。この間を0.005秒のサンプリング周期で計測すると、8K（約8000個）のデータ量となります。この区切りを、データをファイル化する単位とします。約40秒間のデータ区切りは、ファイル化の単位であつて、実際の測定作業は任意の連続時間でデータが記録されます。この場合、ファイルは物理的に複数得られますが、データは論理的に繋がつて得られます。

解析データは元データから選択的に切り出す

解析に載せる振動データは、全体の波形を見て、解析に載せる時間間隔を決めます。実践的には、一つのファイル単位（40秒長さ）から10秒間を切り出して、スペクトル解析に載せる単位とします。この計算には、FFTを利用しますが、解析区間を2のn乗個のサンプルで扱うことに特徴があります。サンプル数の標準としては2048が適当です。このデータのサンプリング周期が0.005秒であると、解析対象は約10秒を取り出すこととなります。

衝撃試験にはサンプリング周波数を1Kとする

構造物は多くの部材の集合ですので、全体としての振動以外に部分的に個別の振動も観察されます。代表的な部材は、トラスの弦材単独、床版、斜張橋のケーブル、などです。これらは、局部的に叩いて振動の感触を調べて検査します。この場合には、レコーダのサンプリング周波数だけを1Kに設定変えし、音の領域500Hzまでの振動を計測するようにします。主に床版を計測することに焦点を当て、加振として小型のFWDを使うように特化した計測システムを提案します。

デジタル化される数値の精度

加速度計は、歪ゲージ式を採用します。歪ゲージは、長さの微小変化が抵抗値の微小変化に比例する性質を利用しますので、測定値の最小単位をマイクロストレイン(10^{-6})で表示します。加速度計の出力は、電氣的にマイクロストレイン単位で2バイトの整数型数値としてデジタル化されます。この値を加速度(m/sec^2)に換算するパラメータは、ヘッダーファイルに記録されている SLOPE です。加速度計は、その最大測定値(容量)でカタログ化されています。構造物の振動測定では $20m/sec^2$ (約 2G)の容量のものを用います。この容量に対するデジタル値が定格出力です。定格出力÷容量が SLOPE である。構造物の振動の加速度レベルは、一般的には $0.02G$ と低いので、定格出力が仮に 2000 であると、デジタル出力は整数値で ± 20 を超えません。数学的に見れば、この数値精度では滑らかな波形を表すことができないと考えますが、時系列データとして統計処理をすることで有意な結果を求めることができます。

整数値並びのデータ構造

一つのデータファイルは、その大きさが、2 バイト整数 $\times 4$ 成分 $\times 8196$ サンプル = 64K バイトのバイナリーファイルとして記録されます。時間的に連続して記録する場合には、自動的に 64K バイト単位でファイルに区切られます。レコーダの停止ボタンで記録を停止させると、64K 未満のデータを含むファイルも作成されます。デジタル化された 2 バイト長の整数の並びは、バイト並びを、文字データとは解釈しないで、最大値 255 の符号なし整数値の並びで考えます。バイトは文字を表す単位ですので、文字並びの習慣で言えば左から右に並べるのですが、物理的なビット構成を説明するときには右から並べる逆順で考えます。そのため、2 バイトを繋いで 16 ビット長さの整数を表すとき、文字並びの順で言うと、右側のバイトを相対的な上位バイト、左を下位バイトと言います。2 バイトの整数型で表現できる数の範囲は (-32768, +32767) であって、負の数は 2 の補数表現で符号化 (encode) されます。負の整数の場合には、下位バイトは、整数値で言えば、128 以上の値が入ります (図 1 参照)

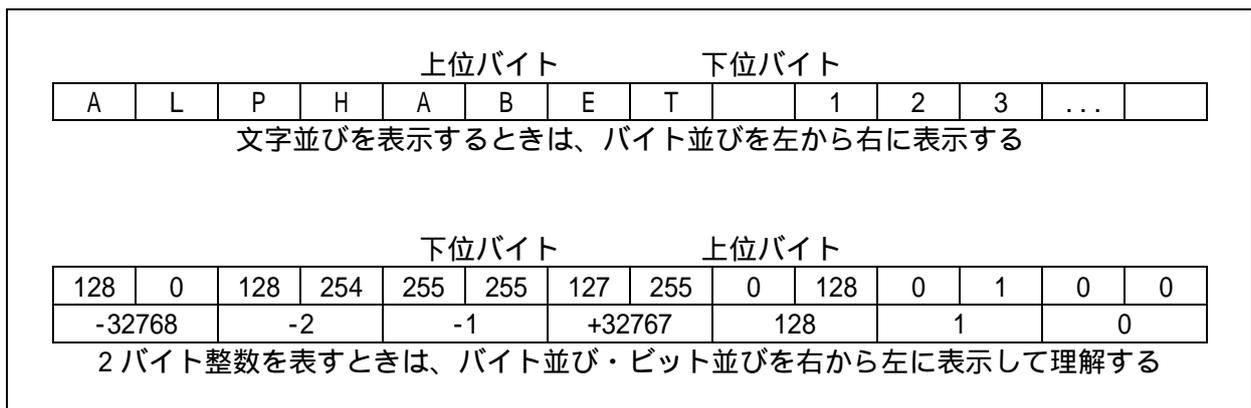


図 1 データファイルのバイト並びの構造

C2. ヘッダーファイル(*.hed)のデータ構造

データファイルの説明用ファイルである

ヘッダーファイルは単純なテキストファイルであって、下の表1のように記述されます。内容確認には、単純なテキストエディタ（NotePad など）で開いて読むことができます。この内容は、データファイル書式と構造を説明するために、データファイルごとにレコーダが自動的に作成します。そのため、ファイル名はデータファイルと同じであって、拡張子が(.dat)に代えて(.hed)が使われます。このファイル名は短く、別の作業の場合にも同名が使われることとなりますので、一連の測定作業では、一意の名称を付けたフォルダ単位にまとめて管理します。

ファイル名の自動発行

ヘッダーファイルとデータファイルのファイル名は、英字一文字と測定単位の順に、昇順の3桁の数字を付けた4文字で自動発行されます。3桁の数字は、000に始まり、255までです。一連の測定は、256ファイルまでです。連続記録は2時間50分までであり、ファイルサイズは約16Mバイトになります。これ以上の記録が必要になるときは、フラッシュメモリを取りかえます。このファイル名は、ヘッダーファイルの第1行にDATASETのキーワードに続けて記述されます。例は表1に示します。英字1文字は、S,C,Fの区別がありますが、これは表1の行番号19のSINGLE, CONTINUE, FREERUNの頭文字です。

テキスト書式は、一行ごとにキーワードに続けて項目が記載される

解析作業用ファイル(*.CSV)を作成するときは、このヘッダーファイルの内容を部分的に引き写し、数値データを利用してデータ変換を行います。ヘッダーファイルのテキストは、1行単位で独立であって、キーワードに続けてスペースを置き、項目単位をコンマで区切った書式で書かれています。項目の区切り文字(delimiter)に、コンマとスペースとが混用されていますので、後で説明する解析作業用ファイルに編集するときは、delimiterをコンマに書き換える書式変換を行います。

表1：ヘッダーファイルの記述事項（例）

行番号	テキスト	説明
1	DATASET F021	F021 がシリーズファイル名である
2	VERSION 1	
3	SERIES CH_1,CH_2,CH_3,CH_4	
4	DATE 09-21-2006	測定日
5	TIME 11:35:04	測定開始時分秒
6	RATE 200	1秒当たりのサンプリング数
7	VERT_UNITS ue,ue,ue,ue	
8	HORZ_UNITS SEC	
9	NUM_SERIES 4	
10	STORAGE_MODE INTERLACED	
11	FILE_TYPE INTEGER	DATファイルが整数型である
12	SLOPE 0.00861,0.008536,0.008237,1	加速度変換パラメータ
13	X_OFFSET 0	
14	Y_OFFSET 0,0,0,0	
15	NUM_SAMPS 8192	サンプル数
16	DATA	
17	RANGE 5000,5000,5000,5000	最大感度で単位はマイクロストrein
18	FILTER PASS,PASS,PASS,PASS	
19	TRIGGER_MODE FREERUN	SINGLE, CONTINUE, FREERUNの種類がある
20	TRIGGER_SLOPE OFF,OFF,OFF,OFF	
21	TRIGGER_LEVEL , , ,	
22	PRE_AREA 0	
23	DATA_SIZE 8K	

<----->

現場測定時の作業手順

D1. 作業単位

測定作業の形態は三通りあること

構造物の振動測定に特化して設定したレコーダ（超小型ひずみレコーダ DC-104R）による現場での測定作業は、レコーダ等の設定作業が済んだものとして説明します。レコーダ操作上の形態として三通りの選択肢があります。

- (a) レコーダ単体で記録作業を行う
- (b) レコーダをパソコンと接続し、制御と同時にパソコン上で波形のモニタリングを行う
- (c) レコーダを簡易情報端末 PDA と接続し、制御と同時に波形のモニタリングを行う

最も単純な測定は(a)の場合です。しかし、波形観察をするモニタが無いので、有意にデータが得られているかどうかの確認ができません。したがって、標準としてはパソコン（ノート型）をモニタリングにする(b)の方法がよいでしょう。(c)は、パソコンに代えてポケットコンピュータを使う場合であって、ノートパソコンよりも小型の装置ですが、その分だけモニタが小画面であり、また操作性がやや劣ります。

レコーダ側から見た継続測定の単位

レコーダで得られるデータ構造は、レコーダの設定で決められます。レコーダのトリガ設定がFREE RUNであるとき、操作上の**作業単位**は、レコーダの start から stop までです。測定継続時間は、構造物の振動測定の場合には少なくとも約 10 秒以上とし、標準として約 40 秒です。手動で start/stop させるので、任意長さの秒数で連続してデータを記録することができます。この場合でも、レコーダは、約 40 秒間のデータを物理的な単位としてファイルに区切り、256 ファイルまでを限度としてコンパクトフラッシュカードに記録されます。この間の延べ時間は、最長で約 2 時間 50 分です。これがレコーダ側から見た最長継続測定の 1 単位です。レコーダ及びパソコンは現場においては電池駆動であるので、電池の消耗を見込むこの時間が 1 単位の目安です。実際の作業では、対象構造物で複数の注目点を選んで移動し、約 40 秒単位で個別にデータを記録します。したがって、1 日の作業でファイル数を 256 まで使い切ることはないとしても、測定待機の時間は電源が on となりますので、測定の区切りで充電の時間を見るか、電池の交換を考えておきます。測定時に電源がダウンした場合、当該のファイルの内容は保証されません。電源関係の改良は、現在もシステム開発課題の一つです。

フラッシュカードは論理的な測定の集合単位

振動データは、フラッシュカードにファイル化されて記録されます。そのファイル名はレコーダが自動発行し、英字一字（トリガ設定が FREE RUN の場合には F）に続けて 3 桁の連続整数（001～255）が割り当てられます。ただし、同一ファイル名に対し、*.dat と *.hed の拡張子の対が作成されます。*.dat ファイルで言えば、ファイル名は自動生成され、ファイル数が 255 を超えることが許されませんので、もし対象測定点数が多くなる場合には、区切りのよい測定点数で新しいフラッシュカードに取替えます。異なったフラッシュカードにも、同一ファイル名が最初から自動発行されるますで、データをパソコンに移す場合にはフラッシュカード単位で別名のフォルダを作成して管理します。

データ解析上の作業単位

橋梁振動の解析に使うデータは、荷重車が橋梁を通過する時間を考慮して約 10 秒間のデータを解析に使いますので、その前後に余裕を見て、約 40 秒間のデータを測定操作上の**作業単位**となるように記録します。この**作業単位**は、レコーダの start から stop までです。1 単位の測定継続時間に得られるデータのサンプル数は、標準として約 40 秒（サンプル数 8K=8192）であり、この長さでファイルの物理的長さが決まります。FREE RUN 設定では物理的に複数のファイルに区切られますが、論理的にはデータは連続します。解析の段階では、全部のファイルを通して閲覧する DataPreviewer と、ファイル単位を対象とする詳細解析に TimeProcess を使います。こちらは、FFT 解析に 2048 サンプル数を使いますので 40 秒間のデータから 10 秒間の区間を選びます。

D2. 測定時の作業

測定作業は二人でペアを組むのがよい

構造物振動測定は、一人で総ての作業ができるように簡易化したシステムで構成できますが、野外での安全作業を考えて、二人でペアを組むのがよいでしょう。その分担は、一人がレコーダとパソコンの操作掛に専念し、もう一人を測定進行時の管理掛です。操作とは、加速度計、レコーダなどの結線と設定条件の確認、電源の on/off、加速度計のバランス、動作確認のモニタリングを経て、記録のスタートとストップです。レコーダの操作場所は、測定環境全体を観察できないこともありますので、記録のスタートとストップを管理係が合図します。橋梁を例とすると、通行車両が橋に進入して通り過ぎるまでの時間を見計らって、作業単位約 40 秒間を計時し、その間に有意なデータが得られるように合図します。この用途には、簡単なタイマー時計を使うとよいでしょう。管理係の重要な作業は、測定時情報を野帳に記録することです。

野帳の書式を決めておくこと

野帳は、記録項目に漏れがないようにするため、あらかじめ、書式を印刷した用紙で準備しておきます。その項目構成の一例を下に示します。

(1) 管理事項

- (1a) 計測日： 西暦年/月/日、例えば、2006/09/21
- (1b) プロジェクト名： 例えば、東京隅田川橋梁
- (1c) 管理番号： データファイルと整合させて後から記入
- (1d) 所属： 所属部局、氏名、など
- (1e) 用紙ページ： 例えば、1/5

(2) 計測番号

一連番号を記入

(3) 構造物名：

例えば、勝鬨橋のような総称名

(4) 対象構造名：

例えば、築地側アーチ橋（複数の独立した構造形式があるので）

(5) 計測位置：

具体的な計測箇所（図面と対応させて記号も併用）

(6) 計測成分

（加速度測定を前提とするが、応力測定も考慮する）

(6a) Ch1：

（橋梁測定の場合、デフォルトは橋軸方向水平動）

(6b) Ch2：

（同、デフォルトは橋軸直角方向水平動）

(6c) Ch3：

（同、デフォルトは鉛直方向）

(6d) Ch4：

未使用（予備として）

(7) 開始時刻：

正確な時刻はファイルに自動記録されるので、大体の時分でよい。

(8) 継続時間：

原則として一回 40 秒程度とするが、長く走らせる場合がある

(9) 計測状況：

例えば、ダンプカーが 3 台、手前車線を走行、のように

(10) 備考：

ファイル名との対応に利用する（失敗の場合は付記する）

ログファイルの作成

現場での計測作業の終了後、なるべく早い時期に、レコーダのフラッシュカードの情報をパソコン側に転記します。フラッシュカードは、計測プロジェクト単位のファイル集合で用いるのが自然ですので、これをパソコン側のフォルダにそのままコピーして集約します。その際、野帳のデータを、ログファイル(log file)に編集して、原始データ合わせて保存します。ログファイルの作成は、EXCEL を応用するとよいでしょう。フラッシュカードを最大に利用したときの原始ファイルの寸法は約 16MB です。なお、測定状況のデジカメ写真は、大量のメモリを費消しますので、必要最小限に抑えます。写真や図面は、野帳の対応する管理番号、計測番号などと対応するように留意します。デジタルカメラのファイル寸法は、そのままでは非常に多くのメモリを費消しますので、不要なデータを削除し、ファイルサイズを縮小する、などの処理が望まれます。

D3. ユーザインタフェース

ユーザインタフェースはシステムの操作法を指す

パソコンの使い方に出てくるユーザインタフェースとは、ユーザがコンピュータの制御をするために、キーボードまたはマウスを操作することによる入力と、コンピュータ側からユーザに情報を知らせるために出力されるモニタ表示との対を指します。レコーダ単体で利用する場合、入力はレコーダ前面のキースイッチ箇所です。レコーダ側からの出力は、4つある**状態 LED**の点灯で確認します。これらの意味は、測定開始前に理解しておき、予行演習などで確認しておきます。操作の要点を下にまとめます。

表 1：レコーダの操作と通知情報

名称	表示	内 容
キースイッチ	start	測定開始と終了時に押す。
	stop	バランス設定は、3秒長押しする。
状態 LED	PWR	通電時は緑、電圧低下は赤に点灯
	SYNC	(複数レコーダの使用時)
	USB	(パソコンとの通信表示)
	MES	測定時は緑点灯、トリガ待ちの時は赤に点灯。

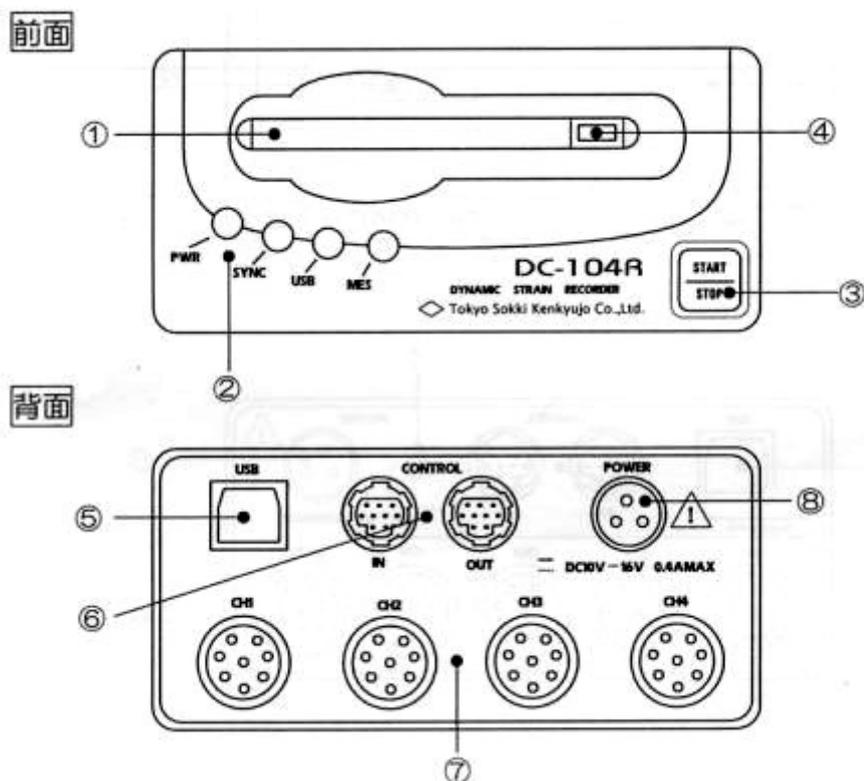


図 1：超小型ひずみレコーダ DC-104R 前・背面パネル

パソコンと接続して使うとき

レコーダをパソコンにUSBケーブルで接続し、パソコン側から操作する場合は、プログラム DC7104.exe を立上げ、メインメニュー画面を表示しておきます。測定時作業は、レコーダを主にツールバーのボタンをクリックすることで測定時作業を行います。メニューやボタンが賑やかに並んでいますので、不注意で関連のないボタンを押すこともあります。その場合の安全対策のために、通常はキャンセルボタンが設計されています（右上の閉じるボタンはかなり危険です）。パソコンと接続することの最も便利な機能は、振動波形のモニタです。上記の表 1 と対応するように、測定時に操作するボタンの機能を表 2 にまとめる。

表 2：測定時操作のボタンと通知情報

	名 称	内 容	
制御	波形モニタボタン	波形モニタウインドウを開く	
	バランスボタン	バランス	
	スタートボタン	測定開始	
	ストップボタン	測定終了	
状態表示	ステータス LED	白	待機中
		赤	(プリトリガ)
		緑	測定時
		青	ファイル書き込み中
		黄	エラー
	波形モニタウインドウ	波形グラフの作図	

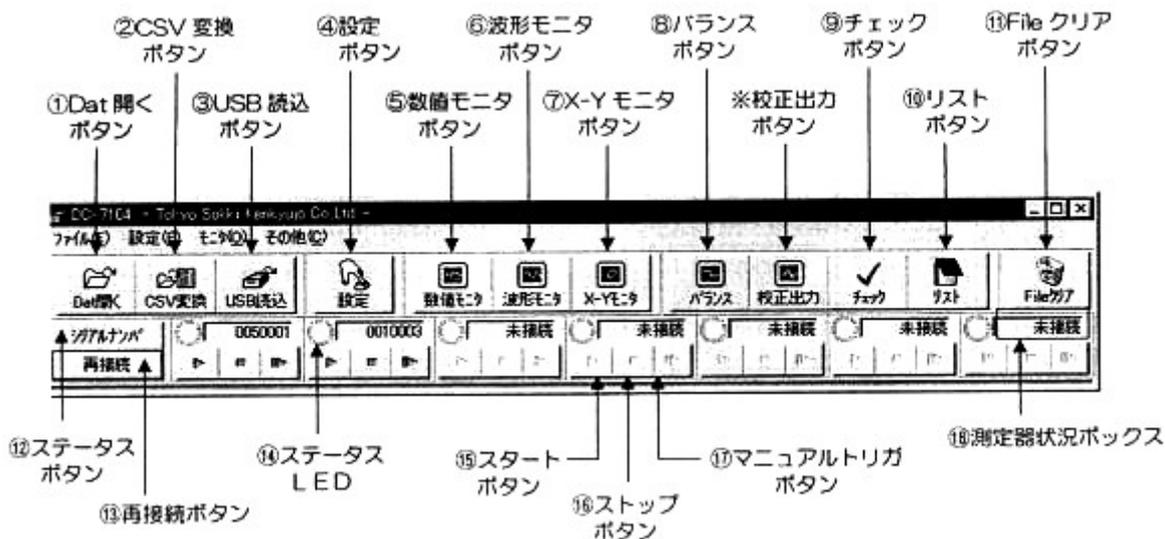


図 2：DC-104R 制御用ソフト DC-7104.exe のメニュー画面

PDA と接続して使うとき（オプション）

PDA は、AC 電源しか利用できないデスクトップパソコンに代わるように、ポケットコンピュータでレコーダの設定と制御を目的としたものです。全体寸法が小さいので、キーを指で押す操作に代えて、スタイラスペンでタップする（タッチスクリーンを軽くつつく）ことで制御します。インターフェースは基本的にパソコンによるインターフェースに準じています。モニタ画面は単純化されていて、測定時に利用するのは、**バランス**と**測定(グラフモニタ)**のメニューです。**測定(グラフモニタ)**の画面に、Start, Stop のボタンが配置されています。

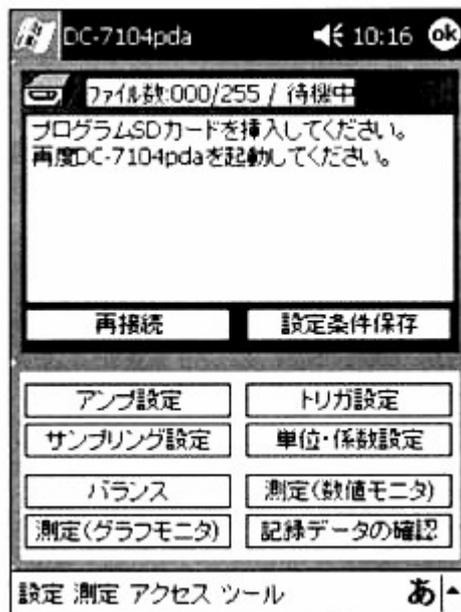


図 3：簡易情報端末 PDA のメインメニューの画面

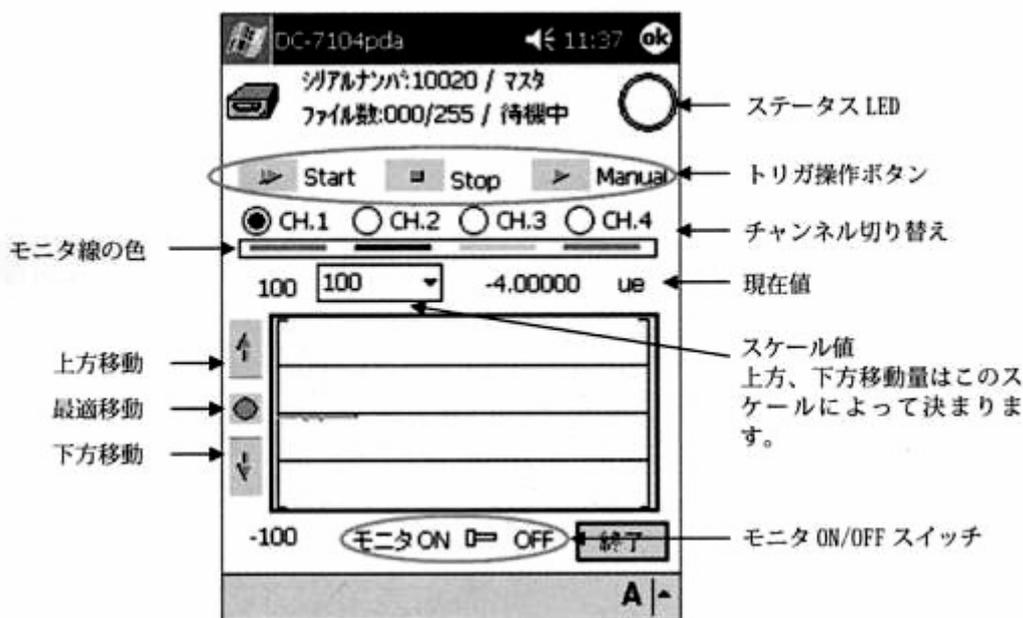


図 4：測定（グラフモニタ）の画面

<----->

構造物の現場振動測定ガイドンス

E1. 調査目的の理解から始める

調査目的は数値データを収集することに置く

知的興味を満たす目的で橋の現地調査をする場合には、橋の写真撮影と建設に関わる話題などを収集します。これに対して、専門的・技術的な調査は、何かの客観的な判断に利用できる**数値データ**を集めることを意識します。例えば、地震などで被害を受けた構造物の調査では、写真撮影に専念することも多いのですが、その撮影方法においても、寸法などの数値が読み取れることを意識します。マスコミでは、言わば野次馬的な興味で写真やビデオ撮影をしますので、それらの資料は専門的な判断に向かないことがあります。専門的・技術的な調査は、数値データを集め、それを判断の根拠に使います。最近の話題としては、構造物の耐震性能、老朽化などの現状データを調査し、補修・補強の提案に繋げるための判断にします。具体的な数値データとして最も標準的なものは寸法に関わります。タワミや変形を調べるのがそうです。コンクリート構造物では、亀裂を調べるのが最も大衆的な調査になっています。写真撮影の場合にも、メジャーや寸法比較のできる物を一緒に写し込むようにします。応力測定や振動測定は、動的に微小な寸法変化を知る方法に位置付けます。これは単純に目視で済ませることができませんので、専用の測定器を使い、訓練を受けた測定器取り扱いの専門家が当たります。コンピュータで構造物の耐震解析すると結果が数値で得られますが、この数値が実際構造物の実情を表すことを証明する実測値と対照できなければ、単なる仮説に過ぎません。多くの耐震診断法はこの類の空説です。

実物の破壊実験ができないこと

構造物が健全であるかどうか直接に検証するには、実際に荷重を作用させて、破壊しないことを確認します。橋梁の上部構造は、完成後に実際通行にさらされます。これは日常的に載荷試験をしていることとなりますので、欠陥があれば忽ち分かります。建築物の耐震診断を直接知るため、設計仮定通りの地震動を作用させる実物試験はできません。地震のときの橋梁被災も、橋脚・橋台・それらを支える地盤が被害を受けることによる巻き添えが大部分です。これらの一般的な構造物の実物試験は、地震の時に得られるのですが、最初から測定装置を備えていることは殆どありませんので、数値データは直接には得られません。したがって、被災の状態を観察して、幾つかの仮説を立てて説明を試みます。一般論として、実験法の定石は、条件を限定した複数の試行を必要とします。地震による被害は、その構造物についての一回だけの実験に相当し、条件も分かりません。大地震では、同じ形式の複数の構造物が同じように被害を受ける幸運？もありますので、この場合には、或る程度の確度で破壊過程のつじつま合わせをします。地震で被害を受ける前の健全？な状態で、何らかの力学的な数値データが知られていれば、その説明の助けになります。破壊させないでデータを得ることを非破壊試験(NDT: non destructive testing)と言います。その最も簡便な方法の提案が**常時微動**による振動調査です。地震はいつ来るか分かりませんし、構造物の数は多いので、大掛かりな測定の提案は実用に向きません。

調査を受託する場合は天の声を待つ

構造物の調査は、研究または管理上の目的で自前の費用を使う場合を除けば、構造物の管理者側が費用を出して作業を外部に委託する形で始めます。したがって、差し迫った事態でもなければ、積極的に調査を発議できません。橋梁の場合、周辺の住民や通行者が、何かの異常を発見して通報することが一つの切っ掛けになることがあります。振動や騒音が大きく感じられる、などの公害振動の苦情が代表的なものです。構造物は何十年も長く利用しますので、理想を言えば、定期的な健康診断に相当する調査が望ましいところです。人間の健康診断の場合と同じように、健全な状態のデータとの比較が無ければ、障害の実像は分かりません。どの程度であれば健全であるかのデータ収集に、簡易な振動調査を利用することができます。比較の対象に使う参考データは二つ考えられます。一つは、同じ構造物について、過去に調査したデータを使うこと。もう一つは同じような構造形式の測定データと比較することです。調査しなければデータが得られませんし、比較に使うデータが無ければ判断ができない、と言うジレンマが起こります。ここからの脱却は、兎に角、構造物の管理者の側で、調査を決断してもらって、比較データの収集に協力してもらわなければなりません。役所的な組織では、前例が無いと動けないジレンマがありますので、十分な事前の説明資料を準備して話を始め、天の声を待つこととなります。

E2. 起振法に工夫も必要である

振動しなければ測定もできない

力学的な構造物は、力に抵抗するように構成します。力が作用して変形しても、力が抜けると元に戻ります。これが弾性的な性質ですので、振動は必然的な現象です。変形が元に戻らなければ破壊です。しかし、振動の現われ方は様々です。橋梁は大きな構造物ですが、通行車両によって起振されますので、例外的に良く揺れる構造物です。居住空間としての建築構造物は、揺れることを許容することはありません。しかし、高層ビルでは長周期振動をすることも少なくないのですが、体で感じない範囲であれば許容する傾向があります。しかし、非常に敏感な人は、船酔いのような不快感を訴えることがあります。地震の時の振動は、低層の建築物の場合とは異なって、長周期の大きな振動になりますが、このような経験は従来なかったことです。大きなビルは、地震の時以外には殆ど揺れませんので、普段の状態では振動を測定することはできません。そこで起振は地震待ちになります。地震計を 24 時間稼働させて待機するのは実践的ではありません。そこで、フライトレコーダ並に、振動をエンドレスに監視しておいて、地震が来たときにレコーダに記録する方法を工夫します。これを、最近の用語ではモニタリングに分類するようになりました。従来はかなり高価な設備を必要としましたが、簡易なレコーダも提案できるようになりました。IT 技術は急速に進歩していますので、ほんの二三年前の知識にとらわれていると恥をかくこともあります。

構造物の振動は確率的な性質があること

構造物の振動は、電気・機械的な装置とは異なって、構造物自体が発振源になることはありません。つまり、何らかの外からの振動に引きずられて振動が発現しますので、**応答振動**として測定に掛かります。構造物には、それ自体に無限に多くの**固有振動**周期を持つのですが、応答振動の場合、固有振動が出たり出なかつたりすると同時に、固有振動数の測定値にも幅があります。これを、確率的な性質と言い、特に顕著な振動を**卓越振動**と区別して言います。卓越振動数を同定したいときには、理論的には三つの実験方法があります。一つはランダムな加振をすること、二つ目は衝撃的な（パルス）加振をすること、三つ目は振動数が変えられる起振機を使って加振する方法です。橋梁の場合には、走行する車両がランダムな加振を実現してくれます。パルス加振は、重量車の後輪を、或る高さの踏み板から落とす、などで実現させます。横方向の加振に、クレーン車で吊り下げた錘を当てる方法も実用されています。小支間の橋梁では、二三人で橋の上で飛び跳ねて揺することもできます。以前は基礎工事に杭打ち機が使われ、これがパルス加振になって振動測定に利用できましたが、公害振動としての苦情が多いことから、最近では行われなくなりました。骨材採取の石切り場や岩盤工事で発破を使うことも加振源ですが、都市近郊では観測することはありません。最後の起振機法は、起振機を準備しなければなりませんので、実験は大掛かりになります。したがって、ランダム加振に期待するのが最も簡便です。常時微動を測定するのもそうですが、振動レベルが低いと卓越振動があっても測定に掛からないことがあります。超高層ビルや長大橋では、強風のときに振動を観測できることがあります。この測定は、地震待ちの観測よりも能率的に計画できます。

少し乱暴ですがダンプカーで起振させる

交通量の多い道路沿いの建築物は、通行車両によって振動することが体感できます。重量車が通行すると大きく揺れます。鉄道沿線では電車の通行で振動するのは日常的に起こります。車両のない閑静な場所であっても、地盤を通して遠くの振動が伝わってくる常時微動を測定することができますが、当該建物周辺の地盤振動挙動とは異なることがあります。宅地造成地では、以前の地山の状態とは違って、切り取りや盛土が施工されていますので、外見的には同じ環境に見えても、局部的には建物の地盤条件が同じではないことが普通です。特に、以前、貯め池であった箇所を整地した場所は、地盤の圧密による不等沈下の苦情がよくでました。これらの箇所は、重量のあるダンプカーを周辺で走らせて地盤振動を測定すると、局所的に振動レベルも卓越振動数も異なって得られます。地滑りの危険がある箇所は主動土圧が作用している向きがあって、遠くを重量車が走行しても、その方向には振動が減衰しないで伝わる場合があります。大きな河川の沖積地では、硬い岩盤の上に軟弱層が乗った地層構造になっていることが多く、遠くの重量車の振動も観測にかかります。また、長周期の卓越振動も解析されることがあります。ただし、数秒もの長い卓越振動は、地盤全体がその周期でゆっくりと振動するのではなく、山彦と同じで、ある距離を地盤振動が往復する周期です。そうと考えなければ、地盤全体の振動エネルギーは巨大になりますので、力学的に説明ができません。

E3. 測定箇所によって振動は異なる

建築では水平動が多く注目されていること

地震による振動現象は、多くの場合、水平方向の振動に注目します。建築物の振動の力学モデルは、倒立振子で代表させますが、構造力学的には曲げではなく剪断変形に注目する剪断モデルが採用されます。ビル建築は高さ方向に階層構造になっていますので、振動変形は上下階の水平方向の剪断変位を下から積み上げるような全体変形になります。そのため、振動周期は（振動数ではありません）ビルの高さにほぼ比例する性質があります。橋梁の上部構造は、上下のタワミ振動の方を主に注目します。橋軸方向（通路方向）の振動及び橋軸直角方向の振動レベルは上下動に較べて小さいので、従来は参考程度の位置付けでデータを記録しました。橋梁は、橋軸回りの捩れ変形も起こしますが、捩れ変形は橋の幅員方向での上下非対称の振動として測定されますので、捩れ振動として同定するには、測定上も、またデータ解析上でも、注意深い扱いが必要です。橋脚・橋台などは、力学的な曲げモデル、または剪断モデルと見るよりも、全体としてロッキング振動をすることが多く、水平動の方が大きいのですが、振動レベルが大きいのが健全さを示します。橋脚・橋台は上部構造の振動を基礎及び地盤に伝え、また基礎地盤からの振動を受振しますので、基礎及び地盤の性質を調べるためにも、振動測定に組み込む必要があります。

波動としての観測

地震動は波の性質があって震源から或る速度で伝わってきます。橋梁上部工のタワミ振動も、波の移動速度があるのですが、通常の測定では橋脚・橋台が節になった定常状態の曲げ振動が固有周期として解析されます。波動としての速度は音速よりも少し遅め、約 200m/s です。したがって、橋長の長い連続橋では、橋両端で振動モードに位相差が出ますが、通常の測定でこの差を問題とすることをしていません。連続体としての構造物本体を伝える音、つまり縦波、も振動として観察されます。音としての波動速度は横波よりも速く、その振動数も、横波、つまり変形を伴う振動にくらべて高い方にありますので、振動解析では雑音として除くようにします。しかし、これにも種々の情報を持つのですが、定石的な解析方法は知られていません。地震のとき、地盤を伝わってくる音を感じると、動物が異常行動をすることが知られています。インド洋の大津波の時に、象が真っ先に高所に逃げ出したそうです。あるコンクリートダムで、振動のデータレコーダ記録を、試しに音として再生して聴いてみたことがあります。反響効果のあるホールで経験するようなエコーがあることが分かりました。この振動数は高いので、普通のスペクトル解析では見つかりません。ある日数の経過後にもう一度測定して聴いてみると、僅かですが、振動数が上がっていました。その間にコンクリートの強度が上がり、弾性係数が上がったためと推定しました。橋脚・橋台の天場で測定する上下方向の振動は、基礎及び地盤を介して伝える音を拾います。これが天場でリバウンドをするため、大きな加速度として得られることがあります。直下型の阪神大地震では、上下方向に圧壊した構造物が多く観察されました。従来、基礎が強固な岩盤であると耐震構造に適すると考えられていた常識が当てはまらないケースでした。この事実を踏まえて、免振構造の提案が多くありました。ただし、その対策は水平方向の振動を緩和させる構造に偏っています。座布団を敷くように、上下方向の衝撃を緩和させるアイデアもありますが、橋梁の支承構造に応用すると別の不具合を発生します。

測定対象の決定には専門知識が要る事

振動測定の対象は、専門ごとに注目する焦点が異なります。一般的に言えば、人間の感覚で理解できる周期的な性質全般に関係します。注目する時間で言うと、長い方は、数分レベルから、時間単位、日数単位、月単位、年単位にまで伸びます。これらは、多くは確率解析の立場で扱い、用語として**再現周期**があります。振動は、身体で感じる振動数範囲（1～50Hz）と、音として感じる周波数範囲（～10KHz）とを別現象と考えるのが普通です。しかし低周波振動はこの境界にある現象です。さらに高い超音波レベルの周期現象は日常的には問題にしません、コンクリートの動弾性係数の試験機はこの範囲の振動を含みます。振動を計測するセンサは、人間の感覚レベルと合わせるような標準化が行われ、それに沿って製品化されます。騒音計や公害振動計は、仕様を標準化することで大衆化に貢献し、これによって専門家以外の多くの人でも測定と判断ができるようにしたものです。振動問題の学問的な奥行きは深いのですが、一方で、大衆化に向くような簡便さの提案が必要です。その繋ぎは、あらゆる機会を通じた啓蒙活動（PR）と、教育を目的としたガイダンスで埋めていくことになります。その中身は、測定対象によって変わります。以下の節は、主として橋梁を対象とする視点でまとめてあります。

E4. 測定の注目点の選び方

構造物はシステムの性格があること

橋梁を例とすると、この構造は幾つもの部材の集合です。それぞれに機能がありますので、幾何学的な構成と機能とを意味する部材名称で呼ばれます。主桁・横桁・縦桁・トラス弦材(上、下、垂直、斜など)・対傾構・水平構・床版、などがそうです。それぞれに力学的な役割分担がありますので、この全体をシステムと捉えます。有っても無くても全体システムに関係しない意匠的な部材が少ないことが、橋梁システムが建築構造と異なるところです。部材単位を振動体として見るときは、力学的な役割分担と関係して現われる現象を捉えるようにセンサを設置しますので、橋梁工学について一応の常識が必要です。例えば、主桁は、橋全体の変形を受け持ちますので、最も振動振幅が大きくなる支間の中央付近の上下動を測定するようにセンサを設置します。実際構造では、主構造が床構造などに隠れていることも多いので、それに代わる床部分にセンサを設置しなければならないことが起こります。そうすると、床構造としてのシステムの性質を大きく測定することもあって、目的とした主構造の性質が隠れてしまいます。つまり、このように、互いに関係を及ぼし合うことが分離できるようにすることが、センサ設置の勘所です。

トラス主構造は格点で測定する

鋼のトラス橋の類は、トラス骨組みに触れることができる場合が多いので、直接主構造にセンサを設置することができます。なるべく、骨組が交わる格点を選びます。トラスの弦材は格点間を繋ぐ梁または柱の性質があって、それ自体が局部的に曲げ振動をすることも多く、その振動レベルが主構造のそれよりも大きくなることがあります。部材内部を通る縦波(音)の影響を意図的に遮断するため、ゴムパッドを介してセンサを設置することも行われます。この場合には、ゴムパッドが周波数フィルタの作用をしますので、その周波数特性をあらかじめ実験的に確かめておく必要があります。トラスやアーチは高さを持つ立体構造ですので、橋軸方向から見れば、捩れと水平移動の変形成分を持ちます。したがって、トラスの上面と下面との相対的な変形が振動で計測できることは研究上の大きな課題です。複数の測定点の同期を取るような測定は、やや手間が掛かりますが、次善の解決として高さを変えた複数の測定箇所を選びます。

桁橋はフランジの箇所がよい

箱桁を含め、鋼の桁橋では、上フランジはコンクリート床版を支えていますので、主桁本体にセンサを設置すると、橋の下側になります。そうすると足場が無ければ作業ができません。簡単な測定を計画するときは、道路面にセンサを置くことになります。床版の上からは主骨組の位置が分かりません。基本的には主桁フランジの直上、横桁の上になる場所の見当を付けて床版コンクリート上にセンサを置きます。床版コンクリートは、思った以上に局部的な変形を受けます。通行車両がセンサの近くを通過するようであれば、データの振幅は大きくても主構造の性質が隠れてしまいます。歩道側に床版が張出していて、高欄や地覆の近くでは、床版の幅員方向の曲げを拾います。このような理由がありますので、可能であれば床版下面で上フランジの近くにセンサを置きます。腹板は、太鼓の皮のような性質がありますので、なるべくならその上を避けます。主桁の下フランジは次善の測定点です。何故かと言うと、下フランジは橋軸直角水平方向の拘束がやや低く、この方向に下フランジが振動することがあるからです。実は、この振動が低周波振動の原因となることがあります。この現象を捉えることも意義があります。

アーチと吊橋は1/4点にも注目する

小支間の桁橋は、構造が単純ですので、第1次の曲げ振動モード以外に複雑な振動はありません。ただし、橋軸方向から見て左右非対称なタワミは捩れ剛性と関係がありますので、その区別ができるような加振方法を意識します。アーチ形式、また吊橋形式の構造では、支間中央に節を持つ逆対称振動が大きく出る傾向があります。この2次振動モードは、支間中央で観測に掛からないわけではありませんが、できれば支間の1/4点を測定箇所に加えます。トラス構造であっても、上弦材が曲弦を描く構造も似たような傾向を持ちます。やや支間のある単純桁橋では第2次の振動モードの振動数は、第1次振動数の約4倍で観察に掛かることがあります。アーチと吊橋は、この比率が下回って測定されます。

橋脚及び橋台での測定を必須としたい

橋脚及び橋台が健全であることを確認する振動測定は、地盤上の測定と合わせて、必須としたいものです。これらの構造物の天場に、センサを直接設置できるのが理想ですが、それが実際に困難であれば、次善の対応としてその位置に代わる路面上などの位置を選びます。橋の支点の構造は、可動と固定の区別がありますので、可動支承直上の桁で橋軸方向の水平動が固定側に較べて相対的に大きく測定される筈です。しかし、高さのある橋脚では、支承の機械的なメカニズムによる振幅は小さく、橋脚は上部構造の重量を頭に載せたロッキング振動を示します。橋台は、橋脚に較べて相対的に剛に施工されますので、振動レベルはさらに小さいのが普通です。振動測定では、この常識を確認するために行います。何かの構造上の欠陥があると、この予見とは異なった結果が出ます。

地盤調査はマクロとミクロの視点がある

地盤は、全体構造物を支え、言わば構造物と地球との接点です。日本では強固な岩盤、つまり地球要素、が構造物の建設箇所に露出している場所は少なく、沖積地を始め、比較的柔らかい地層の上に基礎工事をして、その上に構造物が載ります。住宅としての適地は、昔は、泉を水源とする川沿いか、井戸を掘って飲み水が出る箇所に限られていました。当然ながら、その場所は低地であって、水害の危険と隣り合わせになります。少し高地は、相対的に深井戸を掘らなければなりませんので、資力が無ければ住居には向きませんでした。東京は、山の手と下町に居住区間を言い分けるのは、マクロの見方での地盤の性質により区分に相当します。低地は、適当な地盤改良をしないと高地並の基礎ができません。これはミクロの見方での地盤の性質が関係します。ミクロの地盤造成は、その場所のマクロ地盤の性質と、構造物の規模を勘案しますので、公式的な工法は無く、言わば試行錯誤で行われます。その工法の適否は、地震などの災害の経験を受けて評価されてきました。地盤と構造物の構造形式との相性についてはまだ良く分かっていません。低地の方がマクロの地盤が軟弱であるので、対震設計が難しいという一般常識があったのですが、阪神淡路大震災では地盤の良いと思われていた箇所での震災も多く報告されました。この経験から、耐震設計ではマクロとミクロの地盤の性質を勘案するべきである、と言う提言になります。

橋脚や橋台の振動はマクロの地盤の性質を示す

橋脚、橋台、また、大きな建築物は、比較的深い箇所に基礎を下ろしますので、その振動はマクロの岩盤または地盤の性質を持ちます。ミクロの地盤との接点が眼に見える箇所は、地表との接点です。この箇所は、ミクロの地盤側の圧密沈下などで段差が出て、補修経歴があるのを観察できることがあります。したがって、地盤の性質を比較する振動測定は、橋脚や橋台本体の下部と、表層の地山部分と2箇所が比較できるように測定箇所を選びます。ガス管、水道管などの地下埋設物は、主にミクロの地盤に敷設されます。ミクロの地盤の性質は局所的な変動が大きいので、限られた点としての振動測定から結論を導くときには慎重であるべきです。E2節で、ダンプカーを走らせることで起振させることを解説しましたが、測定箇所が限られていても、ダンプカーを面的に走行させることで、データを比較する方法を取ることができます。

測定箇所の選択は臨機応変で良いこと

振動測定の計画に、公式的な方法はありません。それは、構造物が一つとして同じ条件ではないからです。振動測定を受託するときには積算基準が必要ですが、測定点数に単価を掛ける算定は実践的ではありません。簡易な振動測定は、予備調査または定期的な観測に位置付けます。この結果を見て、より詳しい調査、または視点を変えた調査の提言を行います。測定計画を立案するとき、測定点数を増やしたい要望があり、また、その総てが有効であるような報告をしがちです。いつも良いデータが得られることも期待できません。失敗もあります。失敗を少なくする知恵は、複数の測定が相互に補完し合うようにします。一箇所の振動測定で三方向を同時に測定するのは、最も基礎的な補完の考え方から来ています。橋梁の振動測定で、上部構造だけでなく、地盤や基礎も測定しておく考えもそうです。測定原理の異なる方法を組み合わせることもそうです。応力測定とタワミ測定とを組み合わせることもそうです。その組み合わせの一つに、理論モデルによる解析を位置付けます。理論と実測とが巧く噛み合うことが大切ですので、コンピュータによる理論解析だけでは空論であると言うのです。

〈-----〉

構造物の振動解析の見方

F1. 振動に関する予備知識

振動すること自体は悪い性質ではないこと

構造物の中でも、橋梁は特に振動が大きく感じられます。しかし振動すること自体は、その構造物が健全であることの一つの証拠です。力が作用して変形しても、力が抜けると元に戻る性質があれば、結果として振動現象になるからです。振動の周期が長くなって、変形が行きっぱなしになるのが破壊です。振動数が他の類似構造物と比べて低いか、同じ構造物で以前よりも低くなるのが観察されれば、健全度に注意が必要です。この判断ができるためには、比較できるデータが多いほどよいのです。

周期の長い振動は測定が難しいこと

構造物は、多くの部材で混成された複雑な構造システムです。互いに関連を持った全体を構成すると同時に、独立に振舞う個別の部材が多く含まれます。橋梁は、全体としては曲げを受ける梁の性格を持ちますので、全体の健全度を知る一つの指標が橋の**卓越振動数**です。マクロには、地盤・基礎と関連する橋台・橋脚も診断の対象です。部分的には床版や弦材なども注意します。対象によって振動の出方が違いますので、対象に合わせた測定作業と解析が必要です。橋梁全体の健全度を調べる目的の場合には、橋の固有振動数の出る範囲として 0~100Hz の範囲を考えます。振動数の低い(周期の長い)方の現象を捉えることが重要ですが、0.5Hz 以下の低い振動現象を精度よく測定しようとなると技術的にも難しくなり、また設備も高価になりますので、一般向きではありません。

構造物の振動は応答振動であること

電気・機械装置は、それ自身が発振体であることが多く、定常的な性質がありますので、明確な振動数が測定されます。構造物の振動は、外からの攪乱力に引きずられる応答振動です。幾つかの**固有振動数**で共振すると同時に、攪乱力の方の振動周波数に引きずられます。この影響を少なくする方法が幾つかあって、実践的にはランダム起振法と衝撃試験法を工夫します。橋梁の場合には、自動車の通行によるランダム起振ができます。建築構造物の場合、大きな全体振動は地震による起振に待たなければならないのですが、小規模の建屋では周辺を走る重交通で揺れます。背の高い超高層ビルや煙突などは、強風のときに測定にかかります。周期の長い現象は、振動というよりも、波動の折り返しで観察されるエコーの性質が強く、相関解析で発見できます。

構造物の振動は確率的な性質があること

構造物本体は、理論的には無限に多くの**固有振動数**を持ちますが、実際に測定に掛かるのはその中の幾つかです。こちらを**卓越振動数**と言って区別します。スペクトル図を見ると、幾つもの振動数が計算されます。全体として滑らかな山の集まりに見えるものもあります。減衰係数が小さいと、山のピークが急になり、減衰係数が大きいと、なだらかになります。幾つか理論的な固有振動数があっても、時間的にも場所的にも、条件次第で出たり出なかったり、また、振動数も揺れが見られます。これが確率的な性質によるものです。卓越振動数を言うときは、有効数値を多く取る表現を避けます。

構造物の振動は波動の性質もあること

地震は地盤を伝わってくる波動ですので、速度があることが知られています。その波動は、大きくわけて、波動の進行方向成分の縦波、つまり音の性質を持つ振動と、それと横方向の横波であって、速度が違います。長い支間を持つ橋梁の場合も、この二種類があります。自動車が橋台から橋桁に進入した瞬間、反対側での振動は、波動としての移動速度によって時間差を持って測定されます。通常、曲げ振動では、波動としての速度は空中を伝わる音の速度より小さく 200m/sec 程度です。この速度の横波が支間を往復する時間が、梁としての橋梁の卓越周期になり、その逆数が卓越振動数です。例えば、支間 20m の単純橋では一往復 40m ですので、第 1 次の卓越振動数は約 5Hz です。支間の途中に節(ふし)ができる波形が高次振動数として得られます。連続桁構造では、支点の個所で節ができて、波形が折り返して戻るリバウンドと、隣の径間に伝わる成分が観察されます。

F2. 体感での初等的な診断

立っているよりも座った方がよく感じる

構造物の初等的な診断は、まず、振動を体全体で体感することです。10Hz 程度までの振動は、ストップウォッチを使ってカウントできます。振動現象の体感は個人差があり、また対象物による固有な性質もあります。立っているときは、主に足からくる上下振動を感じます。靴などはクッション作用がありますので、振動数の高い方で感度は下がります。座る、または寝そべると、回転や水平動も感じることがあります。人が振動を感じる周波数範囲とレベルとは個人差があります。一般的に言うと、女性の方が敏感です。振動数として 5～10Hz に最大感度があります。100Hz 以上は音として聴く方がよく分かります。振動数が低く、振動周期にして 2 秒以上になる振動は、体感が難しくなります。

目視で振動が観測できることもある

周期の長い振動で、相対的な変位が大きい場合は、目視で観測できることもあります。トランシットで撓みを観測できる場合に应用できます。橋梁の場合には可動支承の個所や、伸縮目地に注目します。ただし、体感で振動していることが分かっても、振幅は非常に小さいのが普通です(1mm 以下)、目視観測は実用になりません。亀裂が観測できる場合でも、亀裂幅が眼に見えるように動的に変化することはありません。もしそうであれば、その部分は破壊が進行していると判断できます。

手で触れることで感じる

手全体はかなり敏感です。指単独でもよく振動を感じます。しかし、この感触は、振動数にして 30～100Hz の範囲です。電気・機械装置、例えば自動車などで実感できるものです。構造物の振動では、この範囲は構造体を伝わる音(縦波)によるものです。縦波(音)横波の区別は、一般的な振動測定でも区別が付きにくい面があります。

耳で聴く

壁に耳あり、の諺があるように、コンクリート建物の壁などに耳を当てると、構造体の中を駆け巡る音を聴くことができます。直接耳を当てるのではなく、お医者さんの使う聴診器が便利です。紙コップを使った糸電話のような道具でも役に立ちます。遠くからの音が伝わることは、その構造体の材料がその区間で弾性的に連続していることを意味します。ハンマーで叩いて調べるのは、音で聴くことです。叩く場所の周辺の弾性的な反応を聴きます。振動数が高く、澄んで聞こえるときは健全、振動数が低く鈍い音であるのは注意が肝要、砂地を叩くような鈍い感触であれば不良です。澄んでいるか濁っているかは、減衰係数が小さいか大きいかに対応します。

叩いて感触を知る

「石橋も叩いて渡る」の諺にあるように、能動的に加振する操作を「叩く」で表します。この方法は、足踏みする・手で叩くなどの他に、金槌、木槌、掛矢で叩く・重い錘を落とす(FWD)、などの簡単な道具を使うことも含ませます。自動車の走行で、踏み板を通過させて衝撃起振をさせるの叩くの応用です。叩くと言うのはパルスのな加振であって、攪乱力としてはすべての周波数成分を持っていますので、対象物の第一義的な卓越振動が主に発現する、理に適った方法です。水平方向の振動を知るには、例えば木槌や掛矢を使ってその方向に意図的な加振します。ただし、重錘の落下試験のように、衝撃時の運動量を定量的に制御することができません。

橋の上でジャンプして起振させる

比較的大きな橋で、軍隊が歩調を取って橋の上を行進したら大きな振動になった例が知られています。これは、周期的な加振に当たり、上で説明したパルスのな加振とは少し意義が異なります。小さな歩道橋などでは、人の通行で振動することが体感できます。この場合には、振動を体感する人と、ジャンプなどで起振する人と役割を分担します。固有振動数に合うように、リズムを取ると、その振動が大きくなります。測定器を使うことができるときは、種々の振動成分が得られるように、場所を適当に変えて、パルスのなジャンプで起振させます。リズムを取る加振法は起振機を使うのがそうです。少し大掛かりになりますし、振動数範囲で制限があります。

F3. 振動波形の見方

グラフに表す方法に工夫が要ること

振動測定で得られる波形は解析の原点ですので、なんらかの方法で描いた波形全部を見る必要があります。振動は時系列の事象ですので、動的に再現するときは、測定時と同じ時間を割いて観察しなければなりません。図1は、1ファイル約40秒間の波形をオシログラムグラフ状に3行を4段に並べて描かせた波形です。これを**パイログラム**と命名し、DataPreviewerで作成します。グラフに描くと、一瞬にして全体像が分かります。橋梁の振動の場合には、荷重車が橋に進入して通り過ぎるまでを考えた、約40秒間の波形が1ページにまとめて観察できます。振幅には大小ありますので、グラフが見易いように、平均値を0になるように、また振幅の尺度を標準化します。図1のグラフの横軸は、尺度をサンプル数にしてありますので、一行2048サンプルは約10秒の波形を示します。CH3が上下動のデータです。このグラフから大体の振動数を読み取ることもできます。図1と図2（次節で解説します）は、ファイル単位で内容を要約する管理用データとして作成します。このグラフをモニターで観察すれば測定ミスなども分かりますので、不要なデータの判断に使います。利用するデータのグラフは、相互比較が便利のように、ハードコピーを取って、データの検討時に使い、また管理用としても保存します。

振動レベルが低いことも重要なデータである

振動は、振動データが得られなければ解析できません。したがって、種々の方法を使って有意なデータが得られるように工夫します。センサの感度を高くできれば、微弱な振動をデータとすることができます。地盤から伝わる常時微動の観測がそうです。橋脚や橋台は、上部構造の振動を地盤に伝え、また地盤からの振動を受けますが、それを攪乱力として受けて単独での振動を示すことがあります。橋脚や橋台は、それ自体が振動するのは問題がありますので、振動レベルが低いことを確認すれば健全であると診断します。図1では、CH1(橋軸方向水平動)とCH2(橋軸直角水平方向)とはCH3(上下動)に比べて小さいことが確認できます。図1では、最初に大型車両が通過し、その後に小型車が通過した経過を示しています。大型車の通行はゆっくりした振動、小型車の通行では高い振動がでていることが分かります。

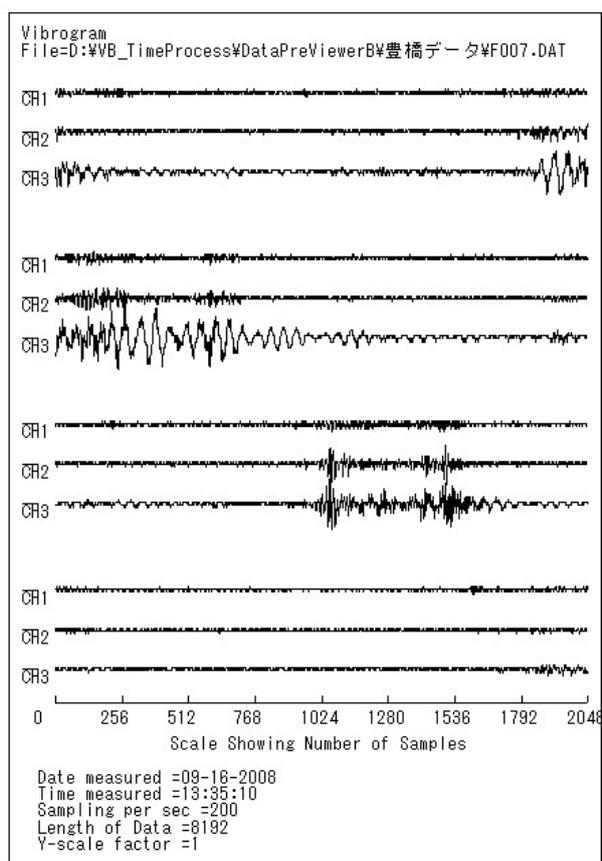


図1：パイログラムの一例

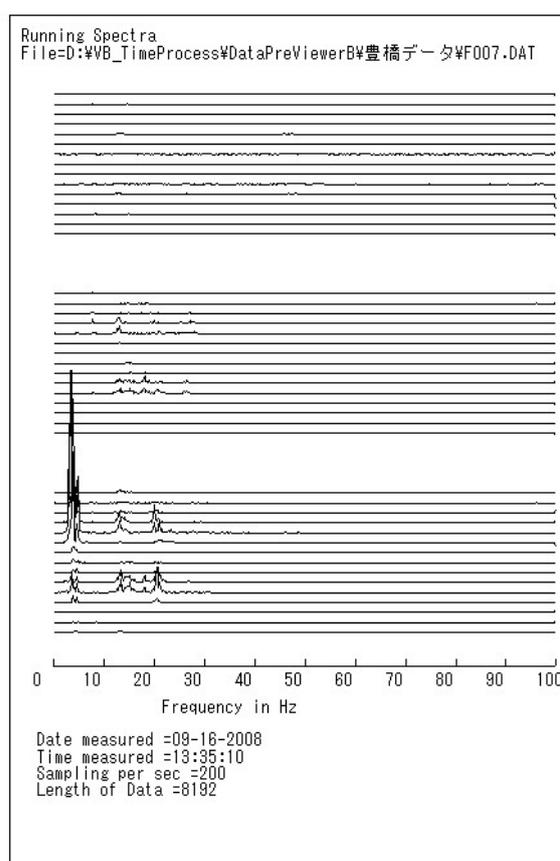


図2：同じデータからのランニングスペクトル

詳しいスペクトル解析にはデータ区間を選択する

図1で見るように、振動現象は振動の大きさも、卓越振動の現れ方も時間的に出たり出なかつたりします。TimeProcessを使う詳細なスペクトル解析は、測定波形から部分的に10秒間のデータを切り出して使います。そうすると、切り出す区間次第で幾つかの卓越振動が同定できない場合も起こります。数学的にスペクトル解析をするとき、元の長い波形のどこを選択的に切り出しても全体の傾向として同じであると仮定します。このような性質がある現象を確率過程と言います。図1の波形は、確率過程とは言えません。したがって、一つの振動波形だけを精密にスペクトル解析をするのでは、全体的な振動性状の判断を誤ることも起こります。したがって、遑って、対象物の複数の個所で、複数回の測定をするようにします。

ランニングスペクトルで有意な卓越振動を見つける

図2は、図1に示した振動波形からサンプル数1024個を取り出して、スペクトル解析をしたグラフです。取り出す位置を、サンプル数512づつ時間的にずらした15本のグラフを上から並べてあります。ブロック別に上からCH1, CH2, CH3です。この方式のスペクトル図をランニングスペクトルと命名しました。同じような表し方は、音声のスペクトル解析で声紋として知られています。このグラフを見ると、有意な卓越振動の山が縦に揃って現れます。また卓越振動が時間的に出たり出なかつたりすることと、振動方向別の成分間での相違が分かります。この全体の平均的なスペクトル値を書き出すことができます。例として、上位から幾つかをリストに出したものを下に示します。最左列は周波数刻み、その右の数字は、成分ごとにスペクトル値を最大100に標準化した値での相対的な強さを示します。すべての周波数についてレベル値を書き出すと行数が多くなりますので、レベルが小さい個所を省きます。

Spectrum calculation			
freq,	Ch1,	Ch2,	Ch3
3.12,	0,	0,	4
3.32,	0,	0,	14
3.52,	0,	0,	41
3.71,	9,	0,	96
3.91,	0,	0,	100
			第一次卓越振動
4.1,	0,	0,	9
4.3,	0,	0,	10
4.49,	0,	0,	25
____途中省略____			
13.28,	57,	37,	10
13.48,	28,	53,	13
13.67,	18,	73,	13
13.87,	13,	91,	12
14.06,	14,	100,	11
			第二次卓越振動
14.26,	33,	75,	8
14.45,	41,	49,	9
14.65,	24,	86,	15
____途中省略____			
19.73,	0,	0,	3
19.92,	0,	25,	7
20.12,	0,	31,	13
20.31,	10,	50,	20
20.51,	15,	79,	29
			第三次卓越振動
20.7,	17,	78,	27
20.9,	14,	64,	19
21.09,	10,	56,	14
____以降省略____			

波形の乱雑さを観察する

振動波形は、対象物の性質を表すのですが、同時に、測定システムのクセも含まれます。図1のバイブログラムの場合でも、横軸と縦軸の比率を変えると異なった印象を与えます(図3)。ビットマップ図は、全体図形で縦横比を変えることしかできませんが、線図では文字寸法をそのままにして線図を描き換えることができます。図1では細かな波形の詳細が分からない場合でも、図3では波数が数えられます。高い振動数成分が多いと、全体として乱雑に見えます。一般論で言うと、比較的周期的な波形を示す場合には、弾性的な性質が大きいことを表しますので、健全度が高いと判断します。ランダムさが大きい場合には減衰係数が大きくなる性質があります。PC構造物はRC構造物よりも減衰係数が低いのが普通ですので、波形のランダムさは、劣化の比較に使うことができます。ただし、RC構造物は新しく建設されたときとの比較ができるデータの蓄積が多くありません。コンクリート床版では、補修前と補修後の振動波形を比べることで、補修の効果を相対的に判断することができます。振動全体がランダム(雑音)である場合は、通常、縦波(音の成分)を拾っています。音がよく伝わることは、対象物が弾性的に連続していることの証左です。一方、砂状の対象物は振動を吸収する性質があります。コンクリートが破壊した極限は砂に返ることですので、周期的な性質が無くなります。

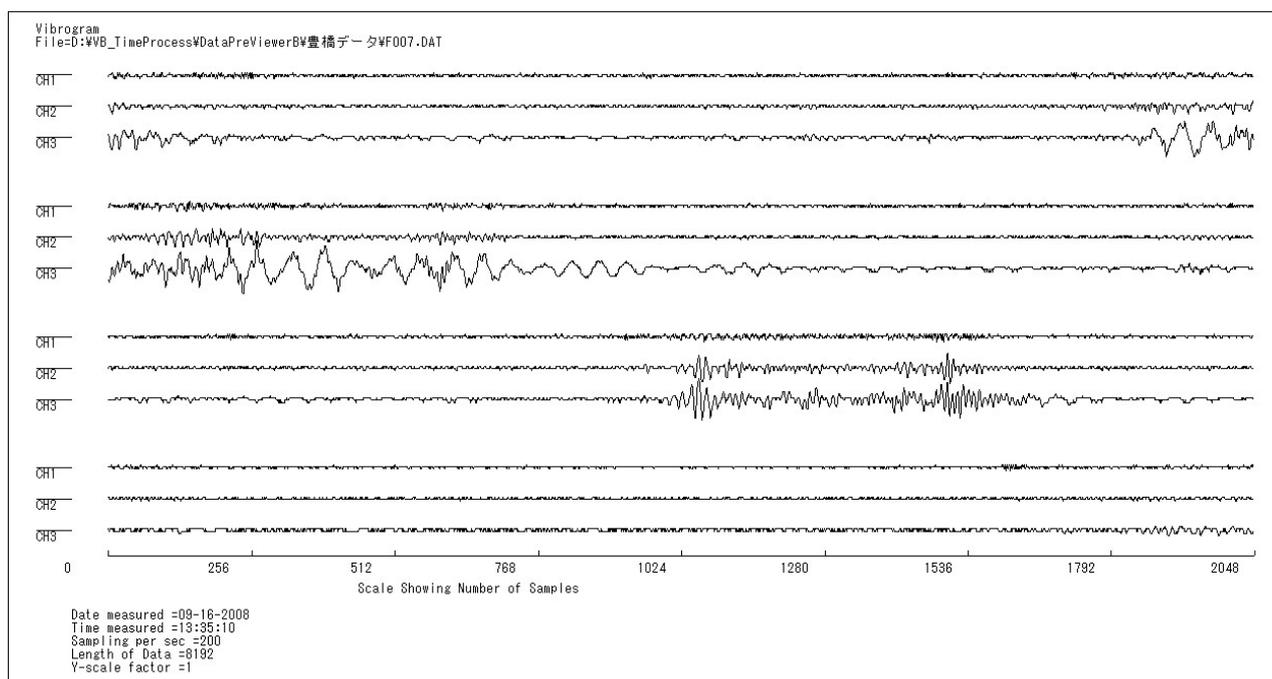


図3：横軸の尺度を引き伸ばしたバイブログラムの表示例

振動方向の成分間の相違を観察する

ある測定点での振動の向きは、力学的には移動と回転とを含めて6成分です。測定用センサは、1方向の移動成分を単位としますので、三成分を分離して測定するため、三成分を一体型にしたセンサを使います。力学的に正確な三成分を分離することはできませんので、測定データ間には幾らか干渉が起こります。橋梁構造物は比較的対称性がありますので、対称軸を揃えるようにセンサを設置します。橋軸方向水平動・橋軸直角方向水平動・上下動では、異なった波形が得られます。しかし斜橋は平面図形的な対称性がありません。この性質は捩れ変形に主に現れ、三成分間で干渉が強く現れます。

捩れ振動の成分の分離は解析から判定する

測定箇所一点で回転振動の成分を求める測定は、ジャイロコンパス系のセンサを使わなければなりませんので一般的ではありません。回転成分は、橋梁構造物では橋軸回りの捩れが主です。通常のセンサを離して対に使い、測定値間の和と差を求めれば移動と回転を分離できます。そうすると作業が少し複雑になり、解析も余分な計算が必要です。捩れがあると、センサの設置場所次第で、上下動と橋軸直角方向の水平動に干渉が見られます。桁橋は全体の橋高が低いので、橋軸直角方向水平動に捩れの影響が殆ど見られません。したがって、捩れの影響は、主に上下動の解析から理論的に推定します。

F4. スペクトル解析の見方

スペクトルの用語と意義を理解しておく

スペクトルは、光の波長別の強さを表す物理学の用語ですが、一般的に振動現象の振動数別、または周期別のエネルギー強さの分布を示す用語にも使われるようになりました。或る時間経過を区切って、その時間の平均エネルギーを1に標準化します。振動数を横軸に取ったスペクトルグラフは、エネルギー分布の密度を表すグラフです。電気工学ではエネルギーをパワーと言う習慣がありますので、パワースペクトルと言います。観察時間を長く取ると、振動数別には出たり出なったりしますので、スペクトルは確率的な出現密度を表すと理解します。ランダムな振動現象のスペクトルは、観察時間をどこに選ぶか、また解析に切り出す時間区切りによっても、グラフの形が変わります。したがって、スペクトルのグラフは、全体をおおらかに見る必要があって、ハミングウィンドウを通して平滑化する方法も使います。したがって、スペクトル数値そのものに物理的な意義での正確さを期待してはなりません。

数値計算で扱うときのスペクトル

スペクトル解析は、数学のフーリエ解析が応用されます。フーリエ係数は、周期成分別に \sin と \cos 成分別に符号を持って、例えば a , b と計算されますので、動径を「 $r^2 = a^2 + b^2$ 」で計算します。二乗の形が、その周期成分のエネルギーの意義になりますので、 r^2 をグラフ化したものをパワースペクトルと言います。これをルートで開いた r でグラフ化したものをフーリエスペクトルと区別して言います。二つのグラフは定性的に同じですが、ルートを開くのは余分な計算が必要ですので、パワースペクトルの方を使います。力学的に言うと、元の波形が速度で得られる場合に限ってパワーのディメンションを持ちます。加速度波形から数値計算的にパワースペクトルを求めると、振動数の高い側、つまり、音に近い性質が大きく表れます。

グラフの尺度の取り方で違う顔になる

スペクトルをグラフに描くとき、尺度に関して幾つかの選択肢があります。横軸に関しては、振動数を取るか周期を取るかの違いと、尺度を線形尺度とするか対数尺度とするかがあります。数値計算は、最小振動数の整数倍の周波数で求めますので、振動数は線形尺度を使うのが分かり易いでしょう。やや専門的には、対数尺度で整理したグラフが便利です。そうしておく、周期を横軸の尺度にすると、グラフの図形が左右逆になるだけです。縦軸の尺度にも線形尺度と対数尺度の使い分けがあります。線形尺度は強い卓越振動を強調しますので、強さが低く表れる卓越振動分が目立たないことがあります。対数尺度の場合には、高さ方向のグラフの凹凸を抑えることができますが、小さな数はマイナスの絶対値が大きくなりますので、全体が程よい高さのグラフになるような調整が要ります。公害騒音計や公害振動系では、人の感知する最小レベルを0としたデシベル表示を使います。これは対数尺度の別の言い換えです。縦横軸を共に対数尺度のスペクトル図にすると、減衰係数が同じになるグラフは、振動数の大小や強さの大小に関係なく、相似な山型のグラフが得られます。別に用意した理論計算のグラフと比較すれば、減衰係数のあらましを推定することができます。

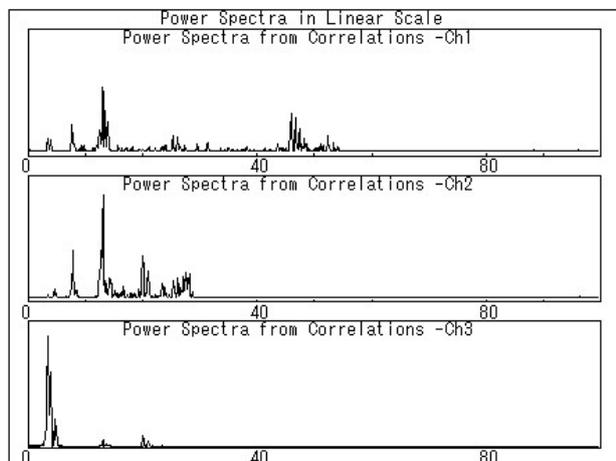


図4：線形尺度によるスペクトルのグラフ

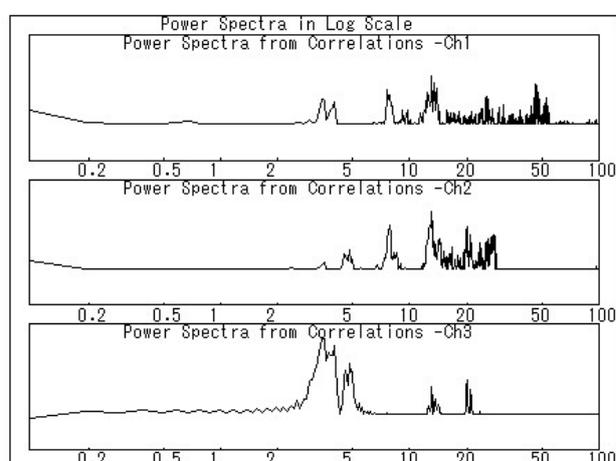


図5：対数尺度によるスペクトルグラフ

F5. 衝撃試験の場合のデータ整理

物理的な意義の強い測定方法であること

木槌や金槌を使って叩き、その振動の出具合で検査するのが衝撃試験です。物理的に見ると、或るマスを対象物に当てて対象物に初速を与える衝突であって、力学的には運動量の保存則が成り立ちます。対象物が弾性的であれば、この初速で自由振動を開始し、減衰して終わります。対象物によりますが、一回につき数秒の短い経過時間の振動現象です。パルス状の外力は、フーリエ成分で見れば、位相と強さがすべて同じで、すべての周波数成分を持った正弦波の集合ですので、対象物の固有振動すべてを発振させます。その中の、発現し易い卓越振動が観察にかかります。対象物の最大初速は、測定された加速度を積分すれば得られます。測定装置側で積分回路を組み込む方法もありますが、経過時間が短いので、加速度データから数値積分をすることで、最大速度と最大変位を求めます。この解析に使うソフトウェアは ImpulseTester です。衝撃力を定量的に制御するには、路盤の検査に使う簡易重錘落下装置(FWD)を床版の振動試験に転用することができます(図6)。これは既知の重さの重錘 m と、落下高さ h を定量的に制御できます。



図6：路盤テストに使う簡易重錘落下装置(FWD)

ImpulseTesterによる床版の測定例

建物形状：鉄筋コンクリート造 2Fにて実施

載荷方法：小型FWDにおける重錘自由落下

15kgの錘を35cmの高さから落下

加速度計：ARF-20A (20m/s²) 上下振幅測定

サンプリング速度：1ms

測定値：

調整後の加速度値 (単位 m/sec²)

Max,	Min
5.678275	-4.625865

一回積分して求めた速度 (単位 cm/sec)

Max,	Min
1.684774	-2.280576

二回積分して求めた変位 (単位 mm)

Max,	Min
9.265043E-02	-0.1170594

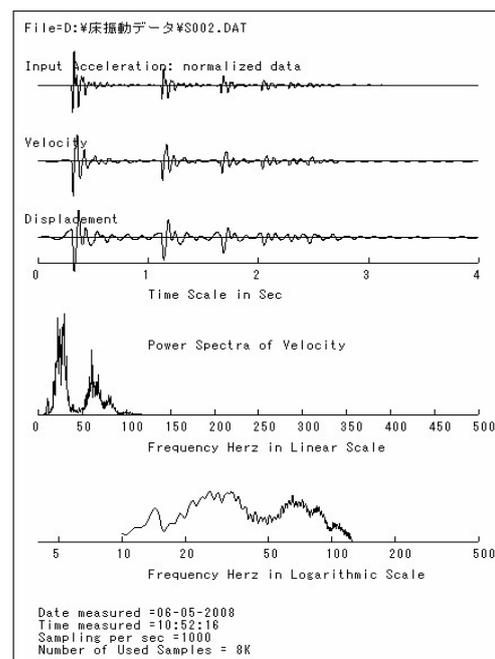


図7：元波形・積分した速度・変位とスペクトル

F6. 診断のあらまし

健全度はまず主卓越振動数で判定する

橋全体の崩壊は最大の悲劇ですが、それは主構造の崩壊で起こります。主構造の健全度は、主構造の卓越振動数で判定することができます。全体は、マクロに見て平面構造力学の梁にモデル化できますので、固有振動数と支間長とに密接な関係があります。橋の設計では撓みの制限規定がありますので、これを考えると、振動数 f の二乗が、支間 L に逆比例する関係が得られ、実際の測定でも統計的に確かめられています。測定された振動数をこの統計値と比較して、高ければ剛性に余裕があると判定できます。低い場合には注意が要ると言えますが、どの程度であれば危険であるかの経験的知見は未だ知られていません。これには二つの理由があります。一つは、低い振動数（2Hz 以下）は、感覚的にも、また振動計測技術的にも検知することが難しくなることです。もう一つは、弾性的な性質が無くなって振動が起きない、または振動が伝わらない場合です。脆性材料、例えばコンクリートが破壊した極限は砂利や砂と同じですが、これらの材料は振動を吸収しますので、振動は伝わりません。外見では形を保っていても、内部摩擦力で外力に抵抗している状態では、何かのきっかけで滑り破壊が起きます。これは、地盤と接触している橋脚や橋台に見られ、破壊が瞬間的に起こる怖い現象です。

橋は立体的な梁の性質があること

橋は、平面構造力学の梁として設計しますが、幅員方向で偏って載る荷重に耐えるように、捩れ剛性と横方向の曲げ剛性を持った立体的な構造に構成します。斜橋などを例外として、橋は平面形状で対称軸を二つ持ちますので、全体としての6成分振動（移動と回転と三成分づつ）は独立に現れます。このうち、上下動・橋軸直角方向水平動・橋軸回りの捩れ振動が重要です。橋軸方向の水平動は大きくないのが普通ですが、橋脚・橋台・支承構造と関連を持ちます。計測技術の面から言うと、捩れ振動は直接測定ができませんので、上下動と橋軸直角方向水平動の解析を検討して推定します。橋の捩れ変形には、左右の主桁の撓み差で生じる成分（曲げ捩れ）と、棒としての断面全体の捩れ成分（単純捩れ）とが合わさって現れます。全体として捩れが小さいことは、左右の主桁を含めた橋全体が共同で偏心荷重に抵抗します。これを設計では横分配が(1/2, 1/2)であると言います。設計上、最も危険側に仮定するのは(1, 0)分配と言います。捩れ振動数と曲げ振動数との比が測定で得られると、実質的な横分配の比率の参考値が得られます。捩れ振動数が大きいと横分配が(1/2, 1/2)の方に寄ります。これは(1,0)分配の設計仮定よりも橋全体としての耐荷力に余裕があると判定することができます。一般論として、鋼桁橋に較べて、コンクリート系の桁橋の方が分配効率が良く、設計時の仮定に較べて実質の耐荷能に余力があります。この理由の一つに、経年によってコンクリートの強度（弾性係数）が設計時よりも幾らか高めになることも影響していると推定しています。

横方向の水平動に注意すること

都市近郊の道路橋は、高架構造で建設されることが多くなりました。この構造は、橋軸直角方向の水平動が比較的大きく測定されることがあります。これは橋脚構造と関連があります。振動の性質としては、剪断振動・曲げ振動・ロッキング振動があります。高架下の空間を有効に利用したいことを考えた一本足構造は、基礎から上部がロッキングする成分として、橋脚直上で観測に掛かります。橋桁の支間中央では橋桁の捩れ成分も現れますので、この二つを分離できると、橋脚と基礎とを含めた全体構造の弾性的な性質の手掛かりが得られます。橋脚・橋台の振動レベルは、通常は小さいのですが、軟弱な地盤または基礎杭が浅い場合は、そうでない場合よりも相対的に大きく得られます。どの程度であれば注意が必要であるかの判定については、今後の多くの測定結果の蓄積に待たなければなりません。

橋台の振動は注意してデータを集める必要があること

橋台は、上部構造の地震時反力を受けるように設計され、橋台間が開く方向の変位で桁部分が落ちることの危険を考える傾向があります。実際には橋台背面からの土圧で橋側に滑ることを考慮した擁壁の考えがありません。橋に進入する大型車が橋台手前の路盤を通過するとき大きなロッキング振動を観察した経験が幾つかあります。

〈-----〉

解析ソフトウェアのユーザインタフェース

G0. はじめに

振動測定から解析までの作業には、現在では Windows 系のパソコンの利用が欠かせません。作業の進め方を標準化することは、大量のデータを手分けして処理する上で重要です。したがって、パソコンの使い方、例えば WORD、EXCEL などについては、ユーザは一通りの使い方の常識があるものとします。パソコン上で扱う問題は、分類的に言えば科学技術プログラムです。WORD、EXCEL に代表されるような事務処理のプログラムの使い方とは幾らか異なります。EXCEL は、技術計算でも便利に使える関数を多く持っていて、作図のツールも使えます。しかし、スペクトル計算をしようとなると、EXCEL では手が掛かり過ぎます。したがって、別のプログラミング言語でコーディングしなければ、小回りの利く処理を開発することができません。科学技術計算は、同じような処理であっても、種々の要求事項に弾力的に対応するため、ユーザレベルで自前のプログラムを作成することが一つの常識でした。そのプログラミング言語には、以前は FORTRAN、16 ビット時代のパソコンでは BASIC が主流でした。しかし、この環境は、OS が Windows に移行すると共に、ほぼ全滅してしまいました。これに代わる大衆的に利用できるプログラミング言語は、現状ではマイクロソフト社の Visual Basic です。この言語もクセがあるのですが、プログラミング資産を多くの人で共用できるツールとして採用することにしました。

G1. プログラムの種類

振動測定から解析までに使うプログラムは、大別してハードウェアに関係するものと、データ解析に使うものがあります。測定記録に使う動歪みレコーダは、パソコン側からみれば外部装置(デバイス)ですので、そのインタフェースと制御用のソフトウェアは、装置のメーカー側で準備したものを使います。測定データは特殊な形式のバイナリー形式のファイルですので、一般ユーザが利用できるようにするため、EXCEL で読める形式の CSV 形式のファイルに変換する機能がサービスされています。ここで説明するのは、解析に使うソフトウェアの方です。上記のバイナリー形式のデータファイルをそのまま読み込むように特化してあります。しかし、同じ様な処理に CSV 形式のデータファイルを利用したい要求もありますので、同名末尾に識別用英字を付けたソフトを幾つか作成してあります。開発した年度によって、幾らか中身の異なるバージョンが複数できることがあります。解析に使うソフトウェアは、差し当たり下に示す 3 種類です。

1 . DataPreviewer#

振動波形全般を観察するパイプログラムの作図と、卓越振動数のあらましを見るランニングスペクトルの作図をします。スペクトル値の抜粋もリストできますので、振動測定結果の速報に利用することができます。バージョン名の末尾#を B とし DataPreviewerB は、バイナリーファイルを直接利用するバージョンを意味したものです。

2 . ImpulseTester#

主として重錘落下装置を使う衝撃試験のデータ解析に使います。解析に使う加速度成分は上下動成分だけを扱います。解析に扱うデータは 1kHz のサンプリング周期のデータ 2 秒間を選択して、数値積分で速度と変位とを求めます。同時にスペクトル解析と卓越振動数とを求めます。

3 . TimeProcess#

測定データの或る特定区間を選択して、やや詳しい分析をしたいときに使います。スペクトル値を求めることの他に、データ波形の順序グラフ、相互相関、回帰分析 (AR 解析) などが組み込まれています。やや専門的な解析に使いますので、この解説書には含ませていません。

G2. 科学技術計算作業の定型

サブルーチン単位の集いで処理を計画する

数値計算を主とする作業には、一つのパターンがあります。それは、「入力・処理・出力」を一つの単位として、それをつなぐ構成です。これは、電気・電子装置で、回路をブロック単位で構成しておいて、それをつないで全体を構成することと似た考え方です。電気・電子回路の配線図に相当するグラフに、コンピュータプログラムの**流れ図**(flow chart)の表示方法があります。図1において、英字を表示した四角なブロックが処理単位を示します。ひし形のブロックは判断を行い、複数の処理のどれかに分岐させる個所です。電気・電子回路では、英字のブロック部分を部品として個別に作成します。プログラミングの場合には、英字のブロック部分をサブルーチン化し、矢印線で処理の繋ぎを示します。ひし形の部分で、異なったブロックにジャンプ命令で繋がります。ブロック部分に相当するサブルーチンを別に用意しておけば、最初から全部のプログラミングをする作業を簡略にまとめることができます。最小単位のサブルーチンとして標準として利用できるのが、数学関係の関数副プログラムです。EXCEL は、種々の関数を利用できるようになりましたので、利用者が増えました。ただし、図1のような組み合わせプログラミングは、VBA の助けを借りるなどの手間が掛かります。

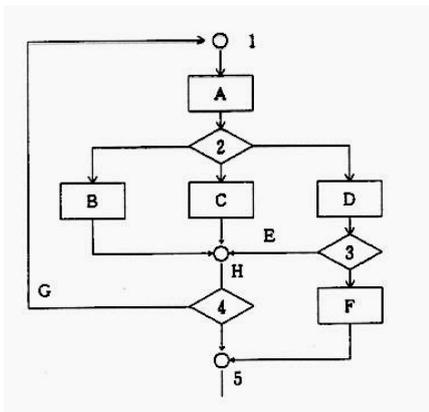


図1 : Flow Chart
(流れ図)

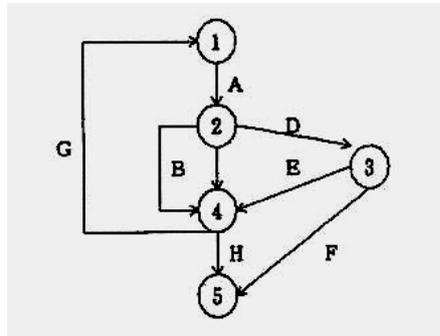


図2 : Decision Graph
(決定グラフ)

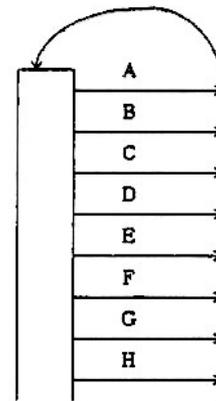


図3 : Path Selector
(選択グラフ)

人が介入する個所を考える場合

図1の処理の流れを途中で監視(モニタ)したいと考え、その監視場所に注目するようなグラフを描くと、図2のように表すことができます。丸番号の個所は、一時的に処理を止めます。そこまでの結果をリストやグラフで見て(モニタして)、次にどの処理を通すか、の判断を決める場所です。単純に次の処理に進む場合もあります。これを**決定グラフ**と呼ぶことにしました。コンピュータを前にして人が実際の作業をすることを考えると、この場所は、物理的にはキーボード一箇所です。ただし、マウス操作に代えることも普通になりました。コンピュータは、キーボードからの入力待ちで一次停止します。指令を受けて次の処理をし、再び入力待ちになります。そうであると、この処理は図3のように表すことができます。英字で書いた処理単位を並列に並べ、左端にある個所で、次にどの処理を選択すればよいかを決めます。これを**選択グラフ**と呼ぶことにします。左端の部分で行き先を制御するプログラムを考えれば、図2の処理が実行できます。図3のまま、行き先を自由に選ぶように計画することもできます。これが Windows の画面でお馴染みの、マウスを使ってアイコンやメニューを選択してクリックする処理に当たります。実は、Windows のシステムでは、マウスを使わなくても、すべてキー操作だけで処理を進めることができるようになっています。この方法がキーショートカットです。

事務処理では大きな作業画面一つが多いこと

WORD や EXCEL を使う事務処理の作業は、文字入力が必要な作業ですので、タイピング技能が必須です。この主処理から脱線的に別の処理、例えばファイルの読み書き、に入るときにマウスを使います。アイコンやメニューの選択は、ランダム的な性格が強いため、滅多に使わない項目まで賑やかに並びます。編集処理の途中でマウスとキーボードとを混在させると操作性が落ちますので、プロのタイピストはキーショートカットを愛用しています。科学技術計算では、数字などのデータはファイルから入力させることが多く、キーボードからの文字入力が少ない使い方になる傾向があります。

G3. モニタ画面の構成

画面はMDI形式

科学技術プログラムの作業画面の計画は、前の第 G2 節の考え方を踏まえて、図 4 のようなウインドウ画面で計画します。この画面全体は MDI フォーム（親ウインドウ）になっていて、その中身を 6 つの部品（オブジェクト）で構成してあります。タイトルバーを別として、上段から、メニューバー、その下に テキスト入力ウインドウ、その下に コンソール出力ウインドウ、左下に プリンタ出力用ウインドウ、右側に グラフィックスウインドウ、最下段に ステータスバーです。親ウインドウはデスクトップ全画面を使うのが標準です。、、は子ウインドウであって、親ウインドウ内部で位置と寸法とを変更して見易く変更することができます。

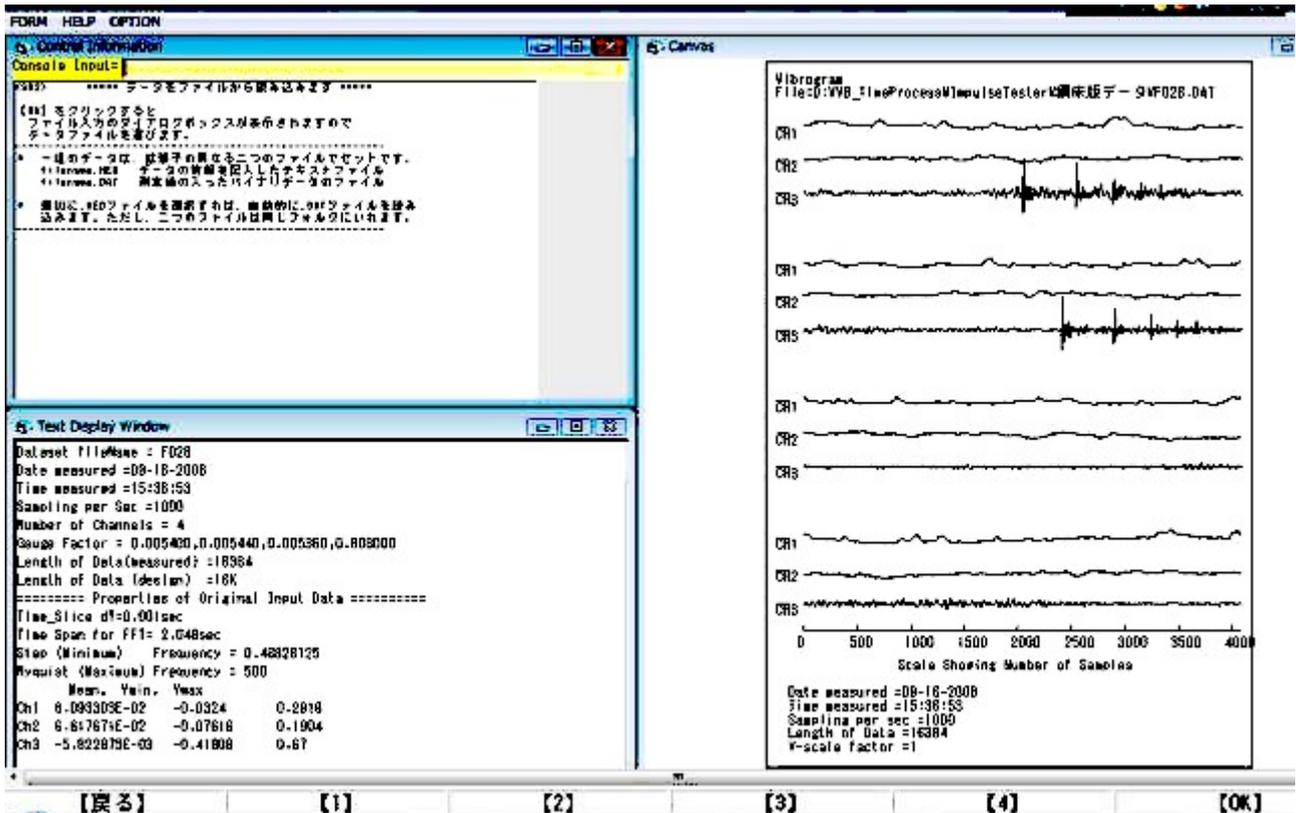


図 4 : 作業画面レイアウトの例

作業の進め方はウィザード方式である

コンピュータを前にして、どのように作業を進めるかの全体をユーザインタフェースとくくります。OS が DOS の場合、モニタ全体をコンソール画面とし、ユーザからのキー入力を要請するプロンプト表示に続けて、ユーザのキー入力をエコー出力します。このときに入力する文字並びをコマンドと言います。この方式が CUI です。コマンドを忘れるか間違えると、何も処理が実行できませんので、ユーザは途方に暮れます。したがってユーザズマニュアルを手許に置いておく必要がありました。コマンドのスペルを覚えておく不便さを解消する方法の一つが、メニューやアイコンをマウスで選択してクリックする方式であって GUI と言います。この場合でも、アイコンやメニューの意味が分からないと困ります。また、どれを選べばよいかでも迷います。したがって、ユーザズマニュアルに代えて HELP のメニューを見るように設計しますが、ヘルプの使い方でも混乱することがあります。HELP を合理的に利用する方法として、ウィザード方式があります。場面に応じて、次に何をすればよいかの適切な案内表示をモニタ画面に出す方法です。図 3 の選択グラフのどのルートを選ぶかを、図 4 のステータスバーのパネルを選択してクリックすることで行わせます。この画面デザインは、DOS の時代の作業画面ではファンクションキーの図柄を画面最下行に表示するレイアウトとして良く用いられました。

メニューバーは脱線的な作業のときに使う

Windows の作業画面では、メニュー項目の定番は FILE, EDIT, HELP の三つです。便利さや機能の追加を考えるとメニューの項目が増え、表示も **ツールバー** を併用する賑やかさになります。メニューは、図 1 または図 2 の処理を管理する流れとは別に、脱線的な作業のときに処理を選択する目的を持たせます。例えば、プリンタ出力用ウインドウのリストまたはグラフィックスウインドウの画像を、ファイルに書き出す、またはプリンタに書き出す場合です。メニューは、子ウインドウに固有する項目がありますので、対象とする子ウインドウをアクティブにするとメニュー項目を入れ替えるようになっていて、メニュー項目が賑やかに増えないようにします。一方、ステータスバーは親ウインドウ直属になっていますので、子ウインドウの状態を変えても図 1 または図 2 の作業に支障が出ません。一般的な Windows の画面設計ではツールバーも使います。しかし、その機能はメニューバーと重複しますので、図 4 のモニタ画面の設計では採用していません。

オブジェクト指向プログラミング

パソコンの OS が GUI を主体した方式になったことで、パソコンの画面は計算結果の表示だけでなく、種々の装置のシミュレータ（模擬装置）を表示して、それを擬似的に操作する使い方に変わってきました。典型的な例が、電卓のプログラムです。電卓の絵柄を表示し、指使いに代えてキーの図柄をマウスでクリックすることで、電卓と同じ処理ができます。図 4 では、プリンタに直接書き出すリストは、プリンタ出力用ウインドウに書き出します。グラフィックスは、グラフィックスウインドウに描きます。この画面は、プリンタやプロッタの擬似的な装置とみなし、幾つかの細かな部品（オブジェクト）の集合とします。その幾何学的な図柄の設計と、機能の付与を余分にプログラミングしなければならなくなりました。これがオブジェクト指向プログラミングです。このプログラミングも、基本的にテキスト形式で準備します。Windows の OS 機能を直接間接に利用しなければなりませんので、かなり面倒です。プログラミング言語のベンダは、ユーザの便を考えて、統合開発環境 (IDE) を提供してくれていますが、ベンダによるクセがあります。Visual Basic は、まずまずの使い勝手があります。

プロトタイプ化したユーザインタフェースの提案

振動現象のデータ解析の数値計算は、スペクトルなどを計算して数値リストで得ることとグラフィックスに描くことに重点を置きます。このシミュレータ装置を、毎回オブジェクト指向プログラミングをするのでは面倒ですので、この骨格部分をプロトタイプとして準備しました。グラフィックス子ウインドウは、別に開発したグラフィックス専用のオブジェクトを流用したものです。元になった子ウインドウでは、カラーの表示ができるなど、欲張ったメニューがありますが、必要度の低いものを省きました。プリンタ出力用ウインドウには、編集機能を持ったリッチテキストボックスを載せてあります。技術計算では、時として大量のリストが出力されます。これをすべてプリンタに書き出しているのは資源の無駄です。リッチテキストエディタ上で編集して不要なリストを削除し、必要に応じてファイルに書き出すことができます。このプロトタイプ化した MDI ウインドウは、従来 of Fortran または 16 ビット時代の Basic で書いたプログラミング資産を Visual Basic 用に書き換えて移植することを目的として開発したものです。

<----->

振動測定データの前処理プログラム DataPreViewerB

H0. あらまし

プログラム DataPreViewerB は、三成分の加速度計を使って、構造物、主として橋梁振動を測定した波形の観察が第一の目的です。入力データは、レコーダのフラッシュメモリに記録した原始データのファイル(*.dat, *.hed)です。従来、振動現象は、アナログ量として測定し、オシログラムに描き出して観察し、その波高値を読み取って、それから改めてデータ解析を始めました。現在では、振動現象を直接デジタル量として記録し、それをファイルに書き出してコンピュータ処理ができますので、巻物のようなオシログラムを描かなくなりました。しかし、長い継続時間の波形を一目で観察できるようなオシログラムは、動的な現象の全体像の理解に役立ちます。この同じ目的に使うグラフが**パイプログラム**です(図1)。この作図で見るように、構造物の振動はランダムな波形を示しますので、そこに含まれる周期成分の大体の様子を見るため、時間をずらしながら刻々フーリエ計算した**ランニングスペクトル**(図2)を作図します。これが、第二の目的です。モニタに表示されるグラフは、そのままプリンタに出力できますので、速報レポート用と原始データの管理用に使うことができます。スペクトル数値をすべてリストすると行数が多くなり過ぎますので、ピーク値の大きい個所を選択して、行数を抑えたリストをプリンタ用ウィンドウに書き出します。これが第三の目的です。

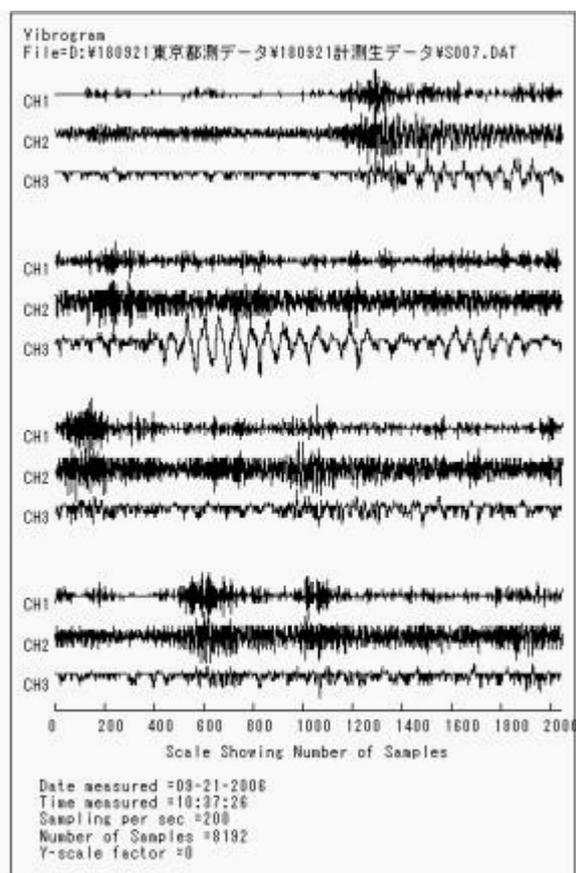


図1: 測定波形のパイプログラム。
オシログラムに相当するグラフです。

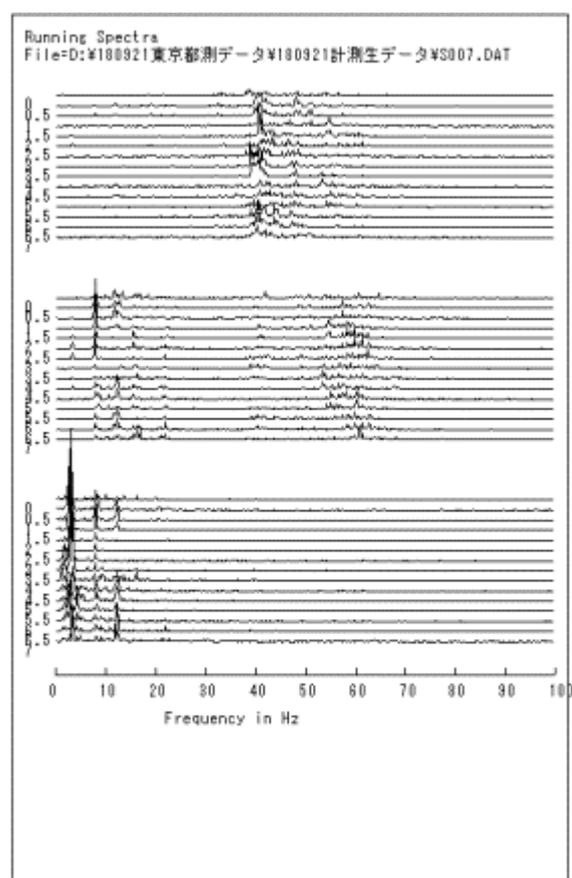


図2: ランニングスペクトル。
縦横軸ともに平均値を標準化した線形尺度です。

H1. モニタ画面の案内表示

立ち上げ時のコンソールの画面<S01>

下に示したリストは、DataPreViewer を立ち上げたとき、コンソール画面に表示されるタイトルです。左上に<S01>と表示されているのがプログラムのステータス番号です。この番号は、プログラムがどの作業状態にあるかを示していて、プログラムの進行によって<S02>,<S03>...のように変わります。これは、付録 G「解析ソフトウェアのユーザインタフェース」の図 2 で説明した決定グラフの番号に相当します。プログラムの進行は、モニタ画面の最下段のパネル番号をマウスでクリックします。どのパネルをクリックすると何をするか説明がコンソールに指示されます。説明のない番号パネルをクリックしても何もありません。この方法でプログラムを制御するユーザインタフェースをウィザード方式と言います。選定する項目数を多くしないように計画しました。

```
<S01>
      Visual Basic 6.0 による時系列解析プログラム
      VB-TimeProcess----Data Monitoring"
      First Version October 2006

      並列 3 事象 n 振動測定データの波形とランニングスペクトルを表示します

      データはテキストファイルから読み出します (例題テキストで試行できます)

      -----

      この画面は開始画面です。【OK】をマウスでクリックするとスタートします。
      この画面に戻ると、それまでの作業に使った入力データは消去されます
      プログラムの終了はどのウインドウでも右上の閉じる X 印をクリックします"
```

ファイル読み出し画面<S02>

この画面が実質的な作業開始画面です。【OK】をクリックするとファイルを読み出すためにダイアログボックスが表示されますので、読み込みたいファイルを選択します。拡張子が(.hed)であるファイルだけが対象です。これに該当しないファイル名はダイアログボックスに表示されません。ファイルが選択されると、自動的に同名で拡張子(.dat)のデータファイルを読み出し、バイプログラム(図 1)を作成して、<S03>の画面に移ります。(.hed)と(.dat)の二つのファイルは同じフォルダに納めておきます。

```
S02>      ===== データをファイルから読み込みます =====

      【OK】をクリックすると
      ファイル入力のダイアログボックスが表示されますので
      データファイルを選びます。  "

      -----

      * 一組のデータは、拡張子の異なる二つのファイルでセットです。
      filename.HED   データの情報を記入したテキストファイル
      filename.DAT   測定値の入ったバイナリデータのファイル"

      * 最初に.HED ファイルを選択すれば、自動的に.DAT ファイルを読み
      込みます。ただし、二つのファイルは同じフォルダにいます。

      -----
```

制御データ表示とバイプログラムの表示画面<S03>

<S03> ===== 計算データの確認と調整をします =====

【戻る】 ---- 別の作業のため、最初の画面に戻ります"
【1】 ---- 入力データのバイプログラムを再表示します。
【OK】 ---- ランニングスペクトルの作図をします"

ファイルのデータが正常に読み出されると、コンソールの表示が<S03>に変わり、ヘッダーファイルの記録の主要な部分のリストとデータファイルのデータの要約がプリンタ出力用ウインドウにリストされます。元加速度波形の平均値(Mean)、平均値を引いた波形から計算した自乗平均値(RMS)、標準偏差(Stdevp)、最大値(Ymax)・最小値(Ymin)が表示されます。なお、バイプログラムは、波形を見易くするため、平均値を0とし、波高の最大値が行幅に収まるように調整してあります。この調整を示すパラメータが、バイプログラムの最下段の Y-Scale factor です。この調整を制御するのは、グラフィックスインドウをアクティブにした状態のメニューOPTION Y-Scale Factor です。波高調整をしないで表示させると、元の波形データとほぼ相似のグラフが得られますが、平均値がズレたグラフになります。

元波形のファイル内容の要約と元加速度波形の統計量のリスト

FileName = D:\VB_TimeProcess\DataPreViewerB\豊橋データ\F004.HED

===== Input Time-Series Data Set =====

Dataset fileName = F004

Version = 1

Date measured =09-16-2008

Time measured =13:33:02

Sampling per Sec =200

Number of Channels = 4

Gauge Factor = 0.005400,0.005440,0.005360,0.808000

Lenth of Data =8192

Length of Data(design) =8K

データ時分割 dT=0.005秒

FFT解析のTime Span = 5.12秒

時間をずらす間隔 = 2.56秒

周波数刻み : Minimum Frequency = 0.1953125

最大周波数 : Maximum Frequency = 100

	Mean,	RMS,	Stdev,	Ymin,	Ymax
Ch1	-1.289861E-02	4.024552E-03	4.446531E-05	-1.950139E-02	1.829861E-02
Ch2	-1.971601E-03	7.437988E-03	8.218013E-05	-0.0578684	0.0563716
Ch3	-1.449918E-03	1.578854E-02	1.744392E-04	-0.1003901	0.1032899

ランニングスペクトルの作図画面<S04>

```

<S04> ===== ランニングスペクトルのグラフを表示します =====

-- パワースペクトルのグラフは周波数とパワースペクトルとを線形尺度
   で表示します。クリップボードへのコピーなどは、メニューから指定"
   します。

-----
【戻る】 - 別のデータを処理するため<S02>の画面に戻ります
【1】 ---- バイブログラムを再表示します
【2】 ---- ランニングスペクトルを再表示します
-----
    
```

元の波形データのスペクトルを、観察時間をずらしながら並べて図化したものが、ランニングスペクトルです（図2）。一本のスペクトル解析に使うサンプル数は1024、全体として512サンプルずつデータの先頭をズラシながら作図します。8192個のサンプル数のデータは、チャンネル当たり15本のスペクトル図が縦に並びます。スペクトルの数値計算はFFTを使い、これからパワースペクトルを計算します。グラフ化のときは、見易くなるように波高を標準化し、ハミングウィンドウをかけて平滑化をしています。一般に、構造物の卓越振動は確率的な性質があって、時間によって出たり出なかったりします。ランニングスペクトルに表現すると、卓越振動のピークが縦に並びますので、隣接している卓越振動の区別ができ、またゴミ的なデータとの区別もできますので、詳細解析をするときの参考にします。また、三成分間の振動の相関を区別し易くなります。ランニングスペクトル15本の平均値を求めると、元波形全体を通したスペクトルになります。この数値をすべてリストすると1000行にもなりますので、多くても100行程度の抜粋をリストするようにしてあります。この方法は、チャンネルごとにスペクトル値が或るレベル以下になる部分を0にしておき、スペクトル値の最大を100に標準化します。スペクトルレベルが3チャンネルすべて0であるものを表示させないでリストを作成します。例を下に示します。

スペクトルのピーク周波数のリスト表示例

Spectrum calculation			
freq,	Ch1,	Ch2,	Ch3
3.12,	0,	0,	4
3.32,	0,	0,	14
3.52,	0,	0,	41
3.71,	9,	0,	96
3.91,	0,	0,	100
4.1,	0,	0,	9
4.3,	0,	0,	10
4.49,	0,	0,	25
4.69,	0,	0,	45
4.88,	0,	0,	13
5.08,	0,	0,	4

(以下省略)

<----->

衝撃加振試験データの解析プログラム ImpulseTesterB

I0. あらまし

"ImpulseTester"は、「**衝撃加振による振動診断システム**」で扱う加速度データ解析に特化したプログラムです。何かの機械部品や構造物が健全であるかどうかを感覚的に確かめる方法として、ハンマーで軽く叩くなど、一寸した衝撃を与えて、その振動の手答えや音で判断することは日常的に行われています。ただし、この判断には経験的な知識を必要とします。この判断を助ける一つの方法は、意図的に計画した衝撃試験をして、データを数値的に解析した結果を見ることです。これを実現させるには、標準化した振動測定装置の提案から始め、解析から結果の評価法までの流れをシステムとして構成する必要があります。ここで説明する"ImpulseTester"は、主として土木・建築構造物のような大型建造物を対象として、健全度や耐荷力の事前調査を対象とした振動診断システムの、解析プログラム部分です。プロトタイプは、地盤の支持力評価に使う重錘落下試験(FWD: Falling Weight Deflectmeter)のシステムですが、汎用の加速度計を使う試験結果の解析に使うように標準化しました。

衝撃加振方法は、重錘落下に限らず、振り子式錘などを使って横向き加振することもあり、また手で叩く、ハンマーを使う、などの様々な場面があります。振動の周波数レベルは、音(縦波)にまで伸びて捕らえられます。いずれの場合も、振動の継続は数秒の短い時間です。測定は、標準仕様として、三成分の加速度計を使いますが、解析対象は一成分です。通常は上下動(CH3)を扱います。計測器、パソコンおよびその周辺装置の性能がよくなりましたので、見掛けとしては、非常に簡易なシステムを提案できるようになりました。"ImpulseTester"は、1成分約4秒長さの加速度データをデジタル化し、これから数値積分で速度・変位を計算して、数値結果と共にグラフ化表示をするプログラムです。測定装置側で、速度型または変位計原理のセンサを採用し、電気回路側で積分や微分を行わせる方法もあります。しかし全体のシステム価格が割高になりますし、やや専門家指向です。構造物の健全度を衝撃試験の結果から判定するには、多くのデータを統計的に集めた知見を必要とします。データ収集と解析の効率を高めるため、プログラムのユーザインタフェースには、プロトタイプ化したウインドウ画面で設計しました。

一般的に言うと、振動試験の加振方法は三種類あります。(1)振動数が変えられる加振機を使う場合、(2)ランダムな攪乱力による場合、そして、(3)衝撃(パルス)的な加振です。(1)は加振機を準備しなければなりませんので、試験計画そのものが大掛かりになります。(2)の場合は、構造物では自然の攪乱力に期待します。橋梁や小規模の建築物では、重量車両の通行で起振させる方法が使えます。この方法の提案と解析に使うプログラムは、DataPreviewer と TimeProcess を使います。(3)の方法は、小規模の範囲、例えば鉄筋コンクリートの床版の剛性検査などに応用します。振動攪乱力の方から言うと、種々の加振振動数を持つ波形がランダムな位相で含まれるのが(2)の場合です。衝撃的な加振(3)の物理的な原理は衝突であって、加振に使うマスと衝突時の速度を掛けた運動量で、対象物に初速を与えます。したがって、測定装置として、既知の質量と自由落下の高さを制御する、小型で簡易な FWD 装置を使います。衝撃加振は、初期位相がすべて揃った状態で加振する現象です。対象個所では加速度を記録しますので、数値積分で速度の最大値を求めます。運動量保存の法則がありますので、初速から対象物を弾性的な1質点系と考えたマスが求められます。振動の卓越振動数をスペクトル解析することで、対象物の剛性が得られます。これを判断して、対象個所の健全度の判定をします。衝撃加振は非常に簡易に実験できる特徴がありますので、標準化した解析ソフトと合わせて「**衝撃加振による振動診断システム**」として提案することにしました。

I 1. 測定器の方の設定

トリガー起動による半自動測定

重錘を落下させた衝撃による応答振動は、普通、数秒内の短時間で済む過渡現象です。測定対象の卓越振動数の発現範囲を勘案して、デジタル記録のサンプリング周波数を決定します。土木・建築構造物のコンクリート床版などを主な対象とする場合を考えて、この周波数を 1K ヘルツに設定します。解析に使うデータ長は約 2 秒、長さにして 2K です。一ファイルのサンプル数を 8K とすると、約 8 秒間のデータを記録し、ここからパルス加振の始まりから 2 秒間のデータを取り出します。測定時間が短いと、レコーダを起動させてからパルス加振までをすべて手動で制御することは効率的ではありません。そこで、加速度計が大きな振動を検出したときをトリガー信号としてレコーダを起動させ、所定のサンプル数を記録させるようにレコーダを設定します。トリガー起動前の、少なくとも 0.1 秒を予備的に PRE-AREA としてレコーダ側のメモリに記録しておいて、衝撃加振の立ち上がり部分のデータが欠けないようにします。トリガーを使わない場合には、測定サンプル数を 16K のように長くしておきます。16 秒の余裕時間があれば、レコーダを起動させてから重錘を手動で落下させる作業でも、2 秒間のデータを取りこなうことはありません。

解析用レコードの長さは 2K に抑えること

振動波形をデジタル化して 1 ファイル単位に記録する長さは、標準として 8K 個、最大 16K 個 (32KB) です。この全部を解析対象にすると長すぎますので、約 2 秒 (サンプル数 2K) を選択して数値積分・FFT 解析・相関分析の対象にします。レコードの頭の部分、PRE-AREA の長さは、測定レコード長の 10% のように設定しますが、バッファメモリの使い方の関係で、実効の PRE-AREA の長さは一定になりません。測定データの波形を頭から見ていけば、最大振幅の個所が分かりますので、このサンプル位置から前方 100 データを含めて解析用の 2K データを数値解析用に取り出します。パワースペクトルを求めると、解析周波数別のサンプル数は半分の 1K 個になり、また、相関解析は 1K 個のデータ長さで時間差別の積和を計算します。したがって、相関関数の時間軸は約 1 秒で表示します。数値計算に使うサンプル数を多くしたいのですが、数値計算の時間効率が悪くなります。実質 1 秒間のデータ長は短いと思うでしょうが、衝撃加振のような過渡現象の記録ならば 2 秒以内に収束しますので、実用的な解析では問題がありません。非常に周期性の顕著な現象では 2 秒を超えて振動が持続しますが、2 秒長さのデータであっても、卓越振動数の同定が簡単にできます。

データ解析の項目

ImpulseTester の解析項目は次のようです。

- (1) 最大加速度 (m/sec²)
- (2) 最大速度 (cm/sec)
- (3) 最大変位 (mm)
- (4) 卓越振動数 (ヘルツ)
- (5) 減衰係数 (無次元)

加速度データから速度・変位を数値積分で計算しますが、元の生データの加速度データに加工を加えて、ドリフト分と、低周波成分と高周波成分をフィルターカットします。バンドパスは、元の波形の FFT 解析して、低周波分と高周波分のフーリエ係数を 0 にして再度逆フーリエ変換で波形を合成する方法を採用しました。数値積分は、過渡現象が短時間で 0 から始まり、0 に収束することを考えて、加速度値を荷重に見立てて、単純梁曲げモーメントを計算する力学モデルを使います。

スペクトルの計算は、上記の FFT 解析の結果を利用する方法と、時系列の回帰計算を応用する自己相関関数を計算して、その cosine 変換で求める方法の二つが比較できるようにしてあります。自己相関関数を計算すると、元の事象のノイズを除き、周期現象を強調します。そのため、再帰的に自己相関関数を波形データとして再度自己相関関数を計算することを繰り返すと、卓越振動数を精度よく求めることができます。自己相関関数から減衰率の計算ができます。この方法は、時系列の解析では自己回帰モデル (AR モデル: Auto-Regressive-Model) と言います。これは、1 質点 1 自由度の減衰項を持つ力学モデルと同じです。

I 2. モニタ画面の案内表示

I 2.1 立ち上げ時のコンソールの画面<S01>

下に示したリストは、ImpulseTesterB を立ち上げたとき、コンソール画面に表示されるタイトルです。左上に<S01>と表示されているのがプログラムのステータス番号です。この番号は、プログラムがどの作業状態にあるかを示していて、プログラムの進行によって<S02>,<S03>...のように変わります。これは、付録 G「解析ソフトウェアのユーザインタフェース」の図 2 で説明した決定グラフの番号に相当します。プログラムの進行は、モニタ画面の最下段のパネル番号をマウスでクリックします。どのパネルをクリックすると何をするかの説明がコンソールに指示されます。説明のない番号パネルをクリックしても何もありません。【OK】をクリックすると、ファイル読み出しのダイアログボックスが表示され、ファイルが正常に読み出されれば<S02>に移行します。

```
<S01>
      Visual Basic 6.0 による時系列解析プログラム
      ImpulseTester
      First Version July 2008"

      単位衝撃を作用させて、加速度・速度・変位の計算をして図化します
      -----

      * 一組のデータは、拡張子の異なる二つのファイルでセットです。
        filename.HED   データの情報を記入したテキストファイル
        filename.DAT   測定値の入ったバイナリデータのファイル
      * 最初に.HED ファイルを選択すれば、自動的に.DAT ファイルを読み込みます。ただし、二つのファイルは同じフォルダにいます。
        入力波形の全データのバイプログラムが描き出されます

      【OK】 ===== データをファイルから読み込みます =====
```

I 2.2 入力データの確認をする画面<S02>

データファイルが正常に読み出されれば、データの要約がプリンタ出力用ウインドウにリストされ、測定単位の 1 ファイル全長のデータを、バイプログラム（図 1）に表示して、コンソール画面に下の案内表示が表示されます。

```
<S02> ===== 入力データのバイプログラムを表示します =====

      * 測定した生データの全チャンネルのグラフを作図します。
        この表示方法は、DataPreviewer と同じ方法です。ただし、
          1 チャンネルだけの測定の場合があります。
          3 チャンネルを測定した場合は、Ch3 だけが解析の対象です。
          他のチャンネルを扱うときは、コンソール画面で、メニュー
          OPTION で切り替えます。ただし<S01>に戻る必要があります。"
      -----

      【戻る】 --- 初期画面にもどり別データ処理を始めることができます
      【OK】 ----- スペクトル計算に入ります。
      -----
```

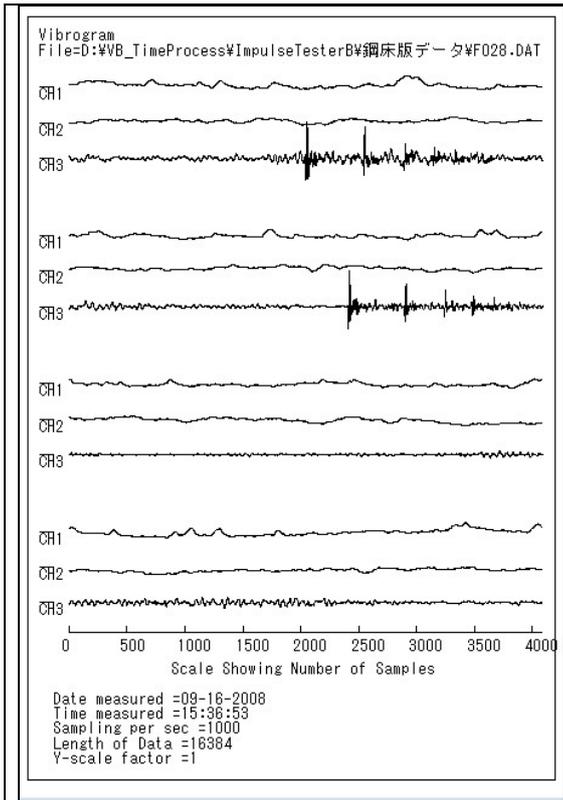


図 1：衝撃試験のバイプログラムの例

このバイプログラムは、3行4段に波形が表示されています。一行横幅は4096サンプル、約4秒です。ファイルの全長は約16秒です。この衝撃試験は手動で重錘を二度落下させました、最初はレコードの始まりから約2秒後、二度目が約6秒後に実行したことがわかります。この衝突現象では、リバウンドによって複数回の衝突が起こっていることがわかります。

解析に使うのは上下動成分（Ch3）をデフォルト設定にしてあります。データの切り出しは、波高が最大になる個所をソフトウェア的に検出して、そこから2秒長さのデータを切り出します。この例では最初のパルスを検出した個所から取りだします。

他のチャンネルを解析対象にしたいときは、一旦<S01>のモニタ画面に戻り、メニューOPTIONで解析対象のチャンネルを選定し直します。

プリンタ出力用ウィンドウに書き出されるリスト（図1の例）

```

FileName = D:\¥VB_TimeProcess¥ImpulseTesterB¥鋼床版データ¥F028.HED
===== Input Time-Series Data Set =====
Dataset fileName = F028
Date measured =09-16-2008
Time measured =15:36:53
Sampling per Sec =1000
Number of Channels = 4
Gauge Factor = 0.005400,0.005440,0.005360,0.808000
Length of Data(measured) =16384
Length of Data (design) =16K
===== Properties of Original Input Data =====
Time_Slice dT=0.001sec
Time Span for FFT= 2.048sec
Step (Minimum)   Frequency = 0.48828125
Nyquist (Maximum) Frequency = 500
      Mean,   Ymin,   Ymax
Ch1  8.093303E-02-0.0324  0.2916
Ch2  6.617671E-02-0.07616  0.1904
Ch3  -5.822875E-03        -0.41808  0.67

```


I 2.4 自己相関関数からのスペクトル解析の画面<S04>

パワースペクトルの計算は、自己相関関数をコサイン変換で求めることができます。自己相関関数の波形は、パルスを与えたときの速度応答と相似な性質を持ちますので、自己相関関数を入力データとして再帰的に自己相関関数を求めると、波形の乱雑さが消えていき、きれいな減衰の自由振動波形になります。この相関グラフから、卓越振動数と減衰係数を計算することができます。

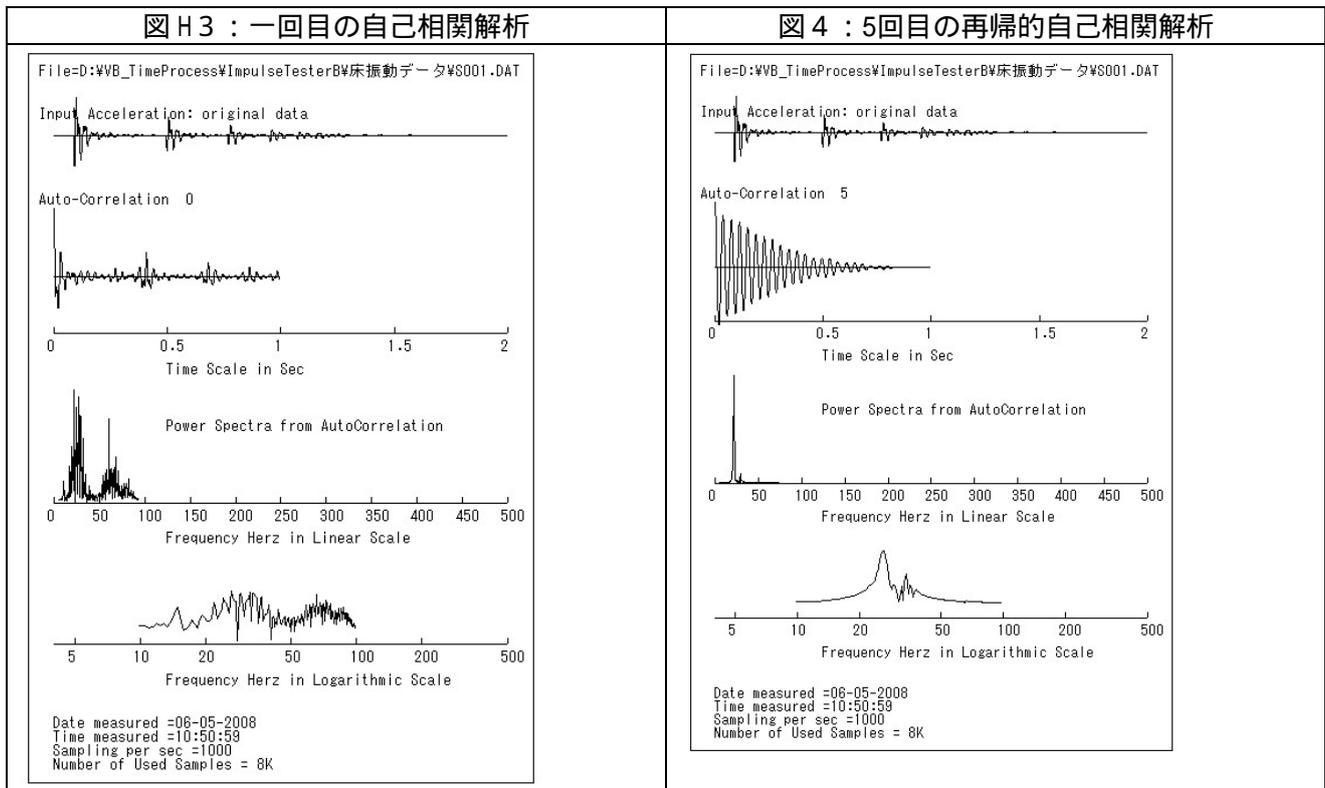
<S04> ===== 再帰的に自己相関関数を計算します =====

* 入力は加速度データを仮定しています。単位は(m/sec²)です
 積分すると速度データになります。単位は (cm/sec)です
 もう一度積分して変位を計算します。単位は(mm)になっています

【戻る】 -- S02 画面にもどり別データ処理を始めることができます
 【1】 ----- 加速度、速度、変位の振動波形のグラフを表示します
 【2】 ----- スペクトルのグラフ（線形尺度と対数尺度）を表示します
 【OK】 ----- 相関関数とそれから求めたスペクトルを表示します

プログラムの終了は、右上の閉じるマーク×を使います。

図3と図4は、上から、解析に使った元加速度波形、その下が自己相関関数、した二つがパワースペクトルですが、線形尺度と対数尺度とを並べました。図3は最初に<S04>に入ったときの相関関数、図4は再帰的に5回の自己相関関数計算をした後のグラフです。



<----->