

構造物の振動調査と診断法

2005-11-17 初版、「橋梁と都市 Project」に連載した原稿を
2007-03-05 Web用 pdf に改訂、

島田 静雄

あらまし

このレポートは、主として橋梁や建築物などの構造物を対象とした振動測定データを解析し、その結果から構造物の健全さを判断する資料を得ることを解説します。この調査の手法は、構造物の耐震性の判定に使うことも視野に入れています。「石橋を叩いて渡る」ということわざがあります。石橋は丈夫ですが、それでも、叩くことで安全が確かめられることを言います。構造物の場合にも、振動の性質から健全度を知ることができます。この方法を工学的なシステムに構築し、実践的に利用する方法を、提案するためにまとめました。振動データから、対象とした構造物の力学的性質を判定し、さらに、それがどのような意義を持つかは、構造物の専門家の判断に待たなければなりません。しかし、一般の人でも、ある程度の判断ができるような参考資料も必要です。多くの人が、振動を測定したデータを相互に比較することができるように、情報の受け入れと公開のインターネットサイトを計画中です。そうしておくことで、対象とした構造物の性質を客観的に判断することができます。振動解析は、理論的には奥行の深い研究対象ですが、多くの人がデータの集積に協力して頂くと、研究資料として非常に助かります。

目次

はじめに	1		
・壊さないで測定することが必要	・人の健康診断と体力測定との類似	・振動から何が分かるか	
・IT技術の進歩は日進月歩であること			
1. 振動データの処理の流れ	2		
1.1 時系列	2		
・データ解析に統計処理が応用されること	・連続データのサンプリング	・時間パラメータの扱い	
・データ処理は何かの目的を持たせること			
1.2 時系列解析の理解方法	3		
・入力・システム・出力・解析	・回帰という言葉	・確率過程の解析	
・ランダムさのクセを確率密度関数で表す	・スペクトル解析を信用し過ぎないこと		
・振動応答は多くの周期成分を持つこと	・標準的なデータの選別	・二つの時系列を同時刻で比較する	
・因果関係を発見する時間差の相関	・数値解析では分からない性質が無数にあること		
1.3 測定装置の特性と補正	5		
・観察と測定の区別	・異なった装置で測定されたデータの整合	・比較ができるように補正すること	
・事象の測定特性は必ずしも線型ではないこと			
1.4 標本の採取と保存	6		
・データストリームとデータマイニング	・定常事象と非定常事象		
1.5 標本のスクリーニング	7		
・スクリーンとフィルタ	・標準処理に載せる準備	・標本個数の制限	・サンプリングの時間間隔
・極値データのサンプリング			
2. 時系列データの前処理	9		
2.1 生データの標準化	9		
・何も加工しないデータの観察から始める	・ファイル保存の標準化もデータ処理であること		
・Excel ファイルはデータの閲覧に便利であること	・なるべくファイルの種類を減らすこと		
・基本的な書誌事項	・数値データの詳細	・基礎的な統計量の計算値	・異常値の調整
2.2 順序統計の利用	11		
・測定データは必ずしも事象を正確に記録しない	・順序グラフによる観察	・順序グラフの曲線形の性質	
・頻度グラフ	・頻度グラフを理想化したモデルが確率密度関数	・データ数値を加工するとグラフが変わること	
・下駄を履かせる調整	・時系列データの順序グラフの性質	・順序グラフの性質を変えるデータ加工	
2.3 数値積分の利用	14		
・振動測定用センサーは加速度型が多いこと	・センサーの周波数特性		
・高い周波数をカットし低い周波数の感度を上げること	・数値積分を応用するのが実践的であること		
・サンプリングの切り直し			
2.4 汎用測定システムの提案	15		
・標準化システム提案の意義	・構造物の振動は3成分同時測定を標準とすること	・センサーの感度特性	
・持ち運びが便利であること	・作業性を考える必要があること		
3. 相関解析とスペクトル解析	17		
3.1 相関関数	17		
・最小自乗法と相関計算とは親戚関係にある	・自己相関関数と相互相関関数		
・スペクトル解析は三角関数との相互相関計算である	・相関関数とパワースペクトルは相互に変換できること		
3.2 確率過程の現れ方	18		
・理想的なランダム確率過程	・自己相関関数は有効なデータ個数を決める判断にも使う		
・散布図は相互相関を視覚的に理解できる			
3.3 図形の解析か周期性の解析か	19		
・フーリエモデル	・式の表現は考え方を整理するために使い分ける	・フーリエ変換と逆変換の意味	
・時間的には同じ現象の繰り返しとする	・離散値でサンプリングするときには注意が必要		
・周期成分の強さだけに注目するとき			

3.4	複素フーリエ変換の図形的な理解	21
	<ul style="list-style-type: none"> ・三角関数の複素数表現 ・複素数の演算則 ・フーリエ級数の複素数表現は二つのベクトルを対に使う ・右回りの表し方もあること ・実関数のフーリエ変換との対応つけ ・二つの時系列の比較に複素フーリエ変換を応用すること 	
3.5	離散フーリエ変換で起こる特別な性質	23
	<ul style="list-style-type: none"> ・DFT と FFT ・三角関数の周期性・対称性・直交性 ・複素フーリエ変換の場合の離散三角関数 ・種々の細かなアイデア ・分かり易いプログラミング 	
4.	構造物回帰モデルの同定と判定	
4.1	線形モデル	25
	<ul style="list-style-type: none"> ・線形の式でモデル化すること ・橋梁の振動モデルは1自由度系と仮定する ・減衰があると振動数は下がること ・連続した3時点での離散化データから式を求める ・時系列データから係数が計算できること 	
4.2	実構造物の振動の判断方法	28
	<ul style="list-style-type: none"> ・静的な撓みと固有振動周期とは関係があること ・橋梁の振動周期は支間の自乗に比例すること ・橋梁の剛性を相対的に判断する ・水平方向の剛性の判定に利用できる 	
4.3	複数の固有周期がある場合	29
	<ul style="list-style-type: none"> ・多質点系としての振動 ・スペクトル解析をすると山の重なりになること 	
5.	測定の実施と結果の解釈	
5.1	科学的解釈法と工学的解釈法	31
	<ul style="list-style-type: none"> ・抽象化から具象化への筋書きに工学的解釈が必要 ・力学モデルは一種類に限らない事 ・振動現象には二つの要因がからむこと ・なにを求めするかをシステム構成で決めること 	
5.2	現場振動測定システムの一つの提案	32
	<ul style="list-style-type: none"> ・三成分振動計測器が基本であること ・測定対象が構造物である場合の仕様 ・センサーの設置場所 ・橋脚・橋台・地盤の振動も重要 ・ヒューマンインタフェース ・モニタリング 	
5.3	振動と波動の解釈	34
	<ul style="list-style-type: none"> ・振動と波動とは見方の違いにあること ・波動には縦波と横波があること ・周期の長い横波の例は吊橋などに現われる ・地盤の長い固有振動周期の解釈 ・コンクリート建造物は縦波を良く伝える ・橋脚は縦波と横波と両方が観察される ・どの程度なら振動を許容できるか ・幾つかの低周波振動 ・低周波振動のメカニズム 	
5.4	地盤の振動	37
	<ul style="list-style-type: none"> ・入力と出力の見方 ・地盤の振動特性は千差万別 ・水を含むと振動に対する性質が変わること ・軟弱地盤上の構造物は地盤と馴染ませる ・耐震構造は縦波用と横波用とで異なる設計が必要であること ・衝撃外力による破壊 ・主動土圧が作用しているときも良く地盤振動が伝わる 	
6.	データ解析のソフトウェア	
6.1	Visual Basic の利用	39
	<ul style="list-style-type: none"> ・自前でプログラミングをする環境が不便になったこと ・ソースコードでの資産管理が必要 ・Visual Basic への書き換え ・Excel の利用も便利であること ・汎用のデータ解析プログラムの提案 	
6.2	処理手順のあらまし	40
	<ul style="list-style-type: none"> 6.2.1 最初の立ち上げ画面<S01> 6.2.2 プログラムのステップ 6.2.3 ファイルからデータの読み出し<S02> 6.2.4 入力データの確認と閲覧<S03> 6.2.5 直流分、トレンドなどの除去<S03A> 6.2.6 相関関数の計算と作図<S04> 6.2.7 パワースペクトルの計算と作図<S05> : 6.2.8 自己回帰モデルを使う計算と作図<S06> : 6.2.9 報告書用に結果を整理した表示 	
7.	振動解析に利用する理論の解釈	
7.1	測定論	47
	<ul style="list-style-type: none"> ・コンピュータは賢く使うこと ・標準化の功罪 ・対象によってシステム構成が変わること ・システム構成は汎用か専用かを考える 	

7.2	FFT 解析の応用と見方	48
	<ul style="list-style-type: none"> ・パワースペクトルは工学的な意義があること ・ランニングスペクトル ・自己相関関数を再帰的に計算する ・パルス状の現象はランダム波の特殊な場合になること ・スペクトル図は確率分布の意義を持つこと ・長周期成分を取り出すときは自己相関関数と併用する ・自己相関関数は衝撃応答を取り出す ・人工的なランダム波と自然のランダム波 	
7.3	構造解析の応用と解釈	53
	<ul style="list-style-type: none"> ・振動解析に使う集中質点のモデル ・振動モードの順と振動次数の順とは違う性質であること ・構造系についての確認が必要であること ・普通の桁橋は曲げ振れが主体であること ・橋梁を多質点モデルで扱う考え方 ・質点一つで3自由度を持つこと ・数学的に独立な構造系 ・動力学モデルは静力学モデルを補正して使う 	
8.	橋梁振動測定のアークイブデータ	
8.1	構造物振動研究の歴史	56
	<ul style="list-style-type: none"> ・特に1960年代以降について解説 ・所見の見直しが必要であること ・大学での研究対象としては制約が大きかったこと ・タイムスパンの長い研究を目指したこと 	
8.2	橋梁上部構の振動実測データと解釈	57
	<ul style="list-style-type: none"> ・単純橋は高次の振動が出ない ・連続橋は近接して三次程度までの振動が得られる ・アーチ系橋梁と吊橋は逆対称振動が第一次である ・都市部の高架橋は新しい構造形式であること ・ケーブル本数の少ない斜張橋は連続橋の性質がある ・長い歩道橋は振れ振動に注意する ・水平動は必ず振れを伴うこと ・アーチ系の橋梁は上下動成分も複雑に現われる ・アーチ系構造は橋軸直角方向の水平動が大きく出易いこと ・PC連続ラーメン橋は新しい形式であったこと ・小支間の吊橋は橋梁工学の教材に手頃である 	
8.3	地盤の振動実測データと解釈	63
	<ul style="list-style-type: none"> ・地盤や岩盤を音が駆け巡ること ・平野と山地とはかなりの差があること ・音としての速度があってエコーもあること 	
8.4	橋脚、橋台の振動実測データと解釈	64
	<ul style="list-style-type: none"> ・まな板の上の豆腐モデルとロッキングモデル ・犬山橋と千鳥橋の例 ・地盤と馴染む基礎構造が最適であること 	
9.	最近行った振動解析__板桁の例	
9.1	データの保存と再利用	65
	<ul style="list-style-type: none"> ・パソコンと周辺装置の進歩が大きいこと ・振動波形データの見方 ・解析例に使った元データの概要 ・振動データの事前加工 	
9.2	ノイズの除去方法	66
	<ul style="list-style-type: none"> ・加速度データを速度または変位データに積分する ・自己相関関数をまず計算する 	
9.3	相関関数の計算とその解釈	69
	<ul style="list-style-type: none"> ・橋梁部の相関関数グラフが示す性質 ・地盤の卓越振動数は上下動と水平動とで異なる ・家屋は方向別に独立した振動を示す ・相対的に長周期成分が観察されること 	
9.4	スペクトル計算とその解釈	71
	<ul style="list-style-type: none"> ・スペクトルは相関関数から計算する ・地盤振動は橋脚から伝えられる ・橋梁部振動の特徴は振れ振動にある ・家屋の振動は橋梁と地盤の両方から加振を受ける 	
10.	最近行った振動解析__トラス橋の例	
10.1	最も多く架設されている橋梁形式	74
	<ul style="list-style-type: none"> ・単純桁橋と単純トラス橋の常識が必要であること ・現況調査をなるべく簡単にしたいこと 	
10.2	振動調査結果の概要	75
	<ul style="list-style-type: none"> ・加茂橋の現況 ・振動は4~8Hzが最も体感が大きくなること ・測定箇所の選択には経験も必要であること ・トラスの振れ振動が得られたこと 	
10.3	振れの性質を表す静力学モデル	76
	<ul style="list-style-type: none"> ・殆どの単純橋は2主桁橋でモデル化できること ・荷重分配が生じるには振れ剛性が必要であること ・二主桁橋の分配係数の定式化 ・トラス橋は一種の箱桁橋であること ・平面構造としては漢字の「日」形 	
10.4	振れの性質を表す動力学モデル	79
	<ul style="list-style-type: none"> ・二質点二自由度でモデル化する ・対称変形と振れ変形の固有振動解がある 	
10.5	多主桁並列の場合の力学モデル	80
	<ul style="list-style-type: none"> ・振れを考えないとスタレ構造になること ・主桁本数全体を平均化して考える 	
10.6	実橋における振れ振動の測定例	81

- ・明確な実測例は未だ2橋しか無いこと
- ・二主桁構造としたときの分配係数の計算
- ・全体をマクロにスラブ構造とした場合の計算
- ・振れ剛性の向上の比率

11. 最近行った振動解析__隅田川の橋

11.1	診断システム開発のモデルとして	82
	・病院システムとの類似で理解する	
	・健康診断は統計的なデータと比較して判断する	
	・診断システムの仕様を詰めるためのモデル作業	
	・技能集団が未だ養成できていなかった	
	・橋の振動レベルも小さいこと	
	・大衆化のために仕様を絞り込むこと	
11.2	振動測定作業の実際	85
	・測定箇所の選択は現場で決めたこと	
	・加速度計と計測ハードウェア	
11.3	データ解析の手順	87
	・測定のハードウェアと生データの記録方法	
	・管理用のグラフの作成	
	・解析に使うファイルへの変換	
	・解析ソフトは一般向けと専門家向けで異なる	
	・振動解析のソフトウェア	
	・解析結果の見方	
11.4	スペクトル解析のまとめと所見	89
	・上下動の卓越振動数が平均して低いこと	
	・振れの性質もあること	
	・健全度の判定には統計的なグラフと比較する	
	・今後の研究課題の一つは加速時計の感度の改良	
	・橋梁は個性的であること	

12. 終章__構造物健康診断のシステム化

12.1	経験的知識と統計的知見	91
	・触って診断することが基本的な方法	
	・経験的知見とは統計的知見であること	
	・特殊な構造物以外には点検専門の組織がないこと	
12.2	記録を残す方法	92
	・カルテに相当する記録簿を作成すること	
	・追加を考える記録方法が重要	
	・構造物のカルテ的な資料構築を考える	
	・報告書は残らないのが普通	
12.3	測定から解析までの標準化	93
	・標準化の考え方	
	・マニュアルの功罪	
	・画像処理やコンピュータ計算を過信しないこと	
	・専門的な測定器が必要になること	
	・破壊の監視と測定による診断	
	・庶務とは雑用のことを言います	

全	3.1.2
全	3.1.2
全	7.2.4
全	7.2.5
全	7.2.6
自由度	7.3.4
斜張橋	8.2.9
主動土圧	5.4.7
周波数特性	2.3.2
集中質点	5.1.1
全	7.3.1
出力	1.2.1
順序グラフ	2.2.2
全	2.2.3
全	2.2.8
順序統計	1.1.3
全	1.3.4
全	2.2.2
庶務	12.3.6
書誌事項	2.1.1
全	2.1.5
小支間の吊橋	8.2.10
衝撃応答	7.2.6
衝撃外力	5.4.5
振動	5.3.1
振動の許容	5.3.7
振動モード	7.3.4
振動応答	1.2.6
振動解析	7.3.1
振動現象	5.1.3
振動次数	7.3.4
振動周期	4.2.2
振動測定用センサ	2.3.1
振動調査	10.2.1
診断システム	11.1.1
全	11.1.3
全	12.3.4

す

スクリーニング	1.5.1
スタレ構造	10.5.1
ステップ信号	3.3.6
スパゲッティコード	3.5.5
スプライン補間	2.3.5
スペクトル	3.3.3
全	1.2.5
全	3.1.3
全	3.3.3
全	9.4.1
全	7.2.1
全	7.2.2
ガラス	3.1.1
スラブ構造	10.6.3
隅田川の橋	11.1.1
図形の特徴	3.3.1
推測統計	1.3.3
全	2.1.7
水平動	8.2.2
数値積分	2.3.1
数値積分	2.3.4

せ

声紋	1.4.2
全	7.2.3
静力学モデル	7.3.1
全	7.3.8
積分	9.2.1
専門的な測定器	12.3.4
線スペクトル	4.3.2
全	7.2.2
線形モデル	4.1.1

そ

相関関数 3.1.1	
全	3.1.4
全	9.3.1
全	3.1.1
相互相関関数	1.2.9
全	3.1.2
全	3.1.2
騒音計	2.3.2
測定	1.3.1
測定論	7.1.1

た

タコマ吊橋	10.6.5
ダッシュポット	4.3.1
縦波	5.3.2
多質点モデル	7.3.2
多質点系	4.3.1
多主桁の力学モデル	10.5.1
体感	10.2.3
対称変形	10.4.2
対風ケーブル	8.2.11
耐震構造	5.4.4
代表値	2.2.2
大衆化	11.1.6
卓越振動数	11.3.6
単位衝撃	4.1.3
単純トラス橋	10.1.1
単純橋	8.2.1
単純桁橋	10.1.1
単純振れ	7.3.7

ち

地盤	5.3.4
全	8.4.2
全	5.4.1
全	8.3.1
全	4.3.2
中央値	2.2.2
超高層ビル	4.2.1
全	5.3.4
長周期成分	7.2.4
直流分	3.3.6

つ

吊橋	5.3.3
全	8.2.5

て

データストリーム	1.4.1
データセット	1.1.1
データベース	12.2.2
データ解析	11.3.1
データ個数	3.2.2
デジタルデータ	1.1.2
デシベル	7.2.1
低周波振動	5.3.8
全	5.3.9
定常事象	1.4.2
定常的(stationary)	1.2.7

と

トラスの振れ振動	10.2.4
ドリフト	1.2.7
全	3.3.6
トレンド	1.2.7
全	3.3.6
度数グラフ	2.2.4
統計処理	1.1.4
統計的知見	12.1.1
動径	3.4.1
動力学モデル	7.3.1
全	7.3.8

な

ナイキスト周波数	3.3.5
長い歩道橋	8.2.11
軟弱地盤	5.4.3
全	8.3.3
全	8.4.1

に

二宮市三	6.1.2
二主桁橋	10.3.1
全	10.3.5
二乗平均値(MS)	2.1.7
入力	1.2.1

ね

振れ	8.2.2
全	10.3.1
全	10.4.1
振れ剛性	10.3.4
全	10.6.4
振れ振動	10.6.1
全	9.4.2
振れ変形	10.4.2

の

ノイズの除去	9.2.1
のこぎり波	2.2.8
全	3.3.6

は

バイプログラム	11.3.2
パルス	2.2.8

全	7.2.7
パワースペクトル	3.1.4
全	7.2.1
全	7.2.1
全	7.2.6
全	3.3.3
橋の振動レベル	11.1.5
波動	5.3.1
破壊の監視	12.3.5
白色雑音	2.2.8
全	3.1.2
全	3.2.1
全	7.2.8
箱桁橋	10.3.2
板桁	9.1.1

ひ

ビジネスグラフ	1.1.4
ヒストグラム	2.2.4
ヒューマンインタフェース	5.2.5
日野幹雄	3.1.4
全	6.1.2
非定常事象	1.4.2
平井 敦	8.2.9
全	10.6.5
標準化	12.3.1
全	7.1.2
標準偏差	2.1.3
全	2.1.7
標本個数	1.5.3
標本抽出	1.1.4
表面波	5.3.6
病院システム	11.1.1
頻度グラフ	2.2.4
全	2.2.5
歪みゲージ式	2.3.1

ふ

フィルタ	1.5.1
フーリエスペクトル	3.3.3
全	7.2.1
フーリエモデル	3.3.1
フェーズ	1.2.8

フライトレコーダ	1.4.2
ブラックボックス	3.5.5
複素フーリエ合成	3.4.6
複素フーリエ変換	3.4.1
複素座標系	3.4.1
複素数	3.4.1
複素数	3.4.2
分散	1.1.4
全	2.1.3
全	2.1.7
分配係数	10.3.5
全	10.6.2

へ

ベクトル	3.4.1
平均値	1.1.4
全	2.1.3
全	2.1.7
平野と山地	8.3.3

ほ

母集団	2.1.7
崩壊	12.3.5
傍証	1.3.2
全	7.1.2
棒グラフ	2.2.4

ま

マイニング	1.4.1
まな板の上の豆腐モデル	8.4.1
マニュアル	12.3.2
曲げ振れ	7.3.7

み

見てくれ	2.2.1
------	-------

め

免震	8.4.2
全	5.4.6

も

モニタリング	5.2.6
--------	-------

望月 重	4.2.4
全	9.4.4

よ

よいとまけ	5.4.7
横波	5.3.2

ら

ランダム確率過程	3.2.1
ランダム波	7.2.7
全	7.2.8
ランニングスペクトル	1.4.2
全	11.3.2
全	7.2.3

り

リサージュ図形	3.4.6
リバウンド	5.3.5
全	5.4.7
全	5.3.6
離散フーリエ変換	3.5.1
離散化	1.1.2
離散三角関数	3.5.3
離散値	3.3.5
流砂現象	5.4.3
力学モデル	5.1.2

る

累積確率密度関数	2.2.5
----------	-------

れ

レーダー	7.2.4
連続橋	8.2.3

ろ

ロッキング	8.2.11
全	8.4.1
全	5.3.6

構造物の振動調査と診断法

はじめに

壊さないで測定することが必要

大きな地震が起きて、橋梁を始め、多くの土木・建築構造物が被害を受ける度に、地震に耐える構造物を計画することの重要性が議論されます。その計画とは、これから建設する構造物の耐震設計を提案することと並行して、既設の構造物を診断して健全度を確かめ、必要に応じて補強する具体的な施行提案とを含みます。どちらの場合でも、その**提案**に実効があることを、**証明**できなければなりません。その方法は、定量的なデータが得られる**実物測定**を根拠にしなければなりません。構造物は図体が大きく、大量生産される工業製品ではありませんので、個別に条件が異なります。条件を整えて具体的な実体のあるモデルによる実験を行ったとしても、その結果は単発的な事実であって、普遍的に応用の利くことは期待できません。地震災害は、天から与えられた貴重な実物実験が提供されたと考えます。しかし、災害前の力学的実態が分かりません。紙の上だけの理論モデルによる研究で耐震設計を提案することはナンセンスです。したがって、まず、被害を受ける前の実物の構造物を測定してデータを集め、それらを統計的に判断することから始める必要があります。調査の目的は、標準化された大量生産品であれば、実物を破壊させるまでの実験法が計画できますが、構造物の場合には、個別に、壊さないで測定をしなければなりません。これを非破壊検査(non-destructive testing: NDT)と言います。

人の健康診断と体力測定との類似

人の病気は、見れば分かるケガなどと、外見では分からない内的疾患とがあります。構造物の場合も、外見から分かる損傷や腐食などは、それなりに対策を立てることができます。しかし、疲労によって強度に余力がなくなってきた場合や、昔の設計で全体的に耐荷力が不足していることは、外から眺めただけでは分かりません。健全度を調べることは、人に例えれば、健康診断や体力テストをすることに当たります。人の場合と同じように、その方法は、眼で見て診察する**視診**に始まります。人の場合には**問診**があります。構造物では何かの事象を観察した人から聞き取りをすることです。この号から始める論説の目的は、客観的なデータを得るために、**触診**に当たる応力測定や、**叩診**に相当する加振とその振動測定を行ない、そのデータ解析から診断をする方法までの一貫したシステムを提案するものです。

振動から何が分かるか

「石橋を叩いて渡る」と言うことわざがあります。石の橋は殆ど揺れませんが、それでも、叩いて振動の手応えで安全が確かめられることを指します。言い換えれば、振動を体感すれば、安全か危険かの情報がある程度分かります。この方法は種々の分野で応用されています。世俗的には、例えば、西瓜の熟れ具合を叩いて判断する、などもあります。工業技術的には、車両検査にハンマーで軽く叩くなどがあります。鋼橋をリベット構造で組み立てていた時代、検鉋は、リベットの頭部をハンマーで叩き、指を当てて振動を体感することで不良リベットを見つける実践的な方法でした。このような振動検査法は感覚的ですので、客観的なデータが得られ、誰でも検査ができる、大衆化した測定システムに構成することを考えます。これには、現地に行って振動データを測定するハードウェアシステムと、そのデータを解析するソフトウェアシステムとのセットで考えます。

IT技術の進歩は日進月歩であること

振動の測定と解析とは、古くから試みられてきましたので、その理論と実践について、かなりの常識があります。実は、それが判断を狂わせます。パソコンの性能が年々良くなってきましたし、それを上回る速度で周辺機器の性能も向上しています。例えば、デジタルカメラの普及は、大容量で小型のメモリが安価に得られるようになりました。これは、測定方法を革命的に改善するインパクトです。IT技術の利用は、最初から測定をデジタルデータとして扱えるようになりました。これらのデータから、何かの有意な性質を求める方法の研究が必要です。この理論的な扱いにおいても、旧来の常識は必ずしも妥当ではありません。説明のために草稿を準備してみると、かなりの説明項目がありますので、数回に分けた章の連載を考えることにしました。

1. 振動データの処理の流れ

1.1 時系列

データ解析に統計処理が応用されること

何かの事象の性質を表すまとまりのデータを、データセット(data set)と言います。広く考えるときは文書データなども含みます。このうち、順序付けられた数値の並びがこの章での理論的な研究対象であって、擬似的に連続関数の扱いをします。この順序付けの媒介変数が時間である振動のような事象を時系列(time process)と言い、数学的には関数 $f(t)$ と表します。この事象には、周期的な性質と確率的な性質とがあって、後者を示す時系列を特に確率過程(stochastic process)と言います。この数値化データは、適度な時間間隔の座標値で扱います。連続的な事象を正確に記録したいとなると、瞬間瞬間の事象変化を繋ぐように時間間隔を細かくした測定をします。そうすると、データ量が非常に多くなりますので、適当な粗い時間間隔でデータを記録するか、短い時間間隔で短時間の測定をして、量を抑えたデータの集合を扱います。このデータから、対象としている事象の性質を解析します。この考え方は、統計処理です。つまり、元の事象を母集団と考え、そこから選択的に標本を抽出し、その標本を解析することで元の事象の性質を判断するからです。

連続データのサンプリング

測定機器を使って得られるデータには種々の種類があります。一般的に言えば、電圧信号で得られる連続した事象がアナログデータです。電圧信号のまま電子・電気的な装置で解析するよりも、連続データを或る時間間隔で区切り①、さらに測定値もデジタル化して②、解析の対象とします。この二つの処理を合わせて離散化(discrete)と言い、全体の処理をサンプリング(標本抽出)と言います。振動波形も、離散化してデジタルデータで扱います。しかし、元は連続事象ですので、静的に数値を扱うときの意味を理解しなければなりません。例えば、道路橋は、自動車の通行で静的・動的な変動をします。力学的振動の性質を知りたい場合と、疲労の原因を知るために振幅の大きさと回数に注目したい場合があります。どちらも、同じ事象から時間の見方を変えたサンプリングです。

時間パラメータの扱い

時系列 $f(t)$ は時間が媒介変数ですので、離散化は、注目時刻と関数値とを対に扱います。そうするとデータ量が増えますので、データ量を節約する標本の採取法を工夫します。最も普通には、時間間隔を一定にして、順序付けられたデータ数値の並びだけで扱います。変動する現象は、その極大値または極小値(またはその両方)とその発生時刻を記録する方法もあります。例えば気象観測がそうです。この場合には、観測期間を決めて、その期間内で最大値または最小値のデータを蓄積します。めったに起きない地震・洪水・強風・高波などの極値は、年単位のような長い観測期間での発生回数と共に考えますので、時間軸に沿って並べる整理方法と少し異なる扱いをし、順序統計が応用されます。

データ処理は何かの目的を持たせること

例えば、橋梁の振動測定データを解析する主な目的は、固有振動数と減衰係数を知ることには焦点があります。データ処理に汎用の統計的方法も応用するのですが、橋梁に特化した解析方法の提案が必要です。そして、この解析結果は、対象とした橋梁の耐荷力を推定するなど、それ以降の種々の判断に利用します。建築構造物では、解析の対象は主に耐震性の判断に利用します。最初の測定計画から最終の解析までに種々のデータ加工が行われますので、これらを考えた上で結果を判断する必要があります。その測定から判断までには、大きく分けて下に示すような項目があります。

- A) **記録の方法と変換**：普通は、事象を電気信号 (アナログデータ) で測定し、これを数値化 (デジタルデータ) にして蓄積保存します。生 (なま) の元データで保存するか、下で説明する標本で保存するかの判断を伴います。
- B) **標本抽出**：測定作業は、時間と費用の制限から、元の事象を部分的に取り出す作業です。例えば、気象観測のデータでは、最初から統計処理を前提とした測定が計画されます。研究目的の測定は、恣意的な標本抽出をします。どちらも、目的外と判断されるデータを省きますので、後で必要が生じるかも知れないデータが失われる危険を伴います。

- C) **統計処理**：標本データは、できるだけ定型的もしくは標準化した数値処理に載せます。比較的汎用性の高い統計処理を応用するのが勝ります。この数値計算には、パソコンの普及が大いに役立ち、とりわけ Excel の統計処理用の関数が便利に利用できるようになりました。
- D) **結果の判断方法**：多くのデータの性質を要約し、そこから何かの判断をするとき、一般の人にも理解できる方法の提案が必要です。そのときの基礎的な判断資料に、**平均値・分散**などの統計的な数値を利用します。データ全体を総括的に理解するには、折れ線グラフや散布図などで表します。これにも Excel などから利用できる、通称で**ビジネスグラフ**(business graphics)のツールが便利になりました。しかし、振動解析は奥行きが深いテーマですので、例えば相関解析やスペクトル解析も使います。これを見て、どう判断するか提案が必要ですし、より総合的な判断には、専門家の協力がが必要です。

1.2 時系列解析の理解方法

入力・システム・出力・解析

何かの事象の記録とは、原因となる事象のデータが或る**システム**に**入力**され、そのシステムによって変調された**出力**結果であると考えます。システムは一つとは限らず、何段ものシステムを経過します。この流れに、因果関係があると考えます。この意味は、どこかで原因とは無関係な乱れが発生しないことを仮定しています。時系列の**解析**は、出力のデータに更に加工を加え、その全体の流れから、原因となる**元の事象の性質**か、**システム自身の特性**か、もしくはその両方を推測することです。この流れの中で、データは質の変化を受けます。まず、測定器に使われている電気・電子回路に**特性**があります。連続した時系列のデータを離散化することは、ハイパス及びローパスフィルタの作用があつて、非常に大きなデータ質の変化が起こります。そして、解析はそのデータを部分的にしか扱うことができません。このデータ流れを考える場合、ある程度の仮説を入れて単純化を図ります。橋梁の振動測定で得られる時系列のデータは、原因となる加振側の性質を**確率過程**と仮定し、システムと見る橋梁に弾性的な性質がありますので、これを**回帰モデル**の仮定に当てます。

回帰という言葉

橋梁振動の時系列データは、統計的に見れば、回帰的な性質を持ちます。**回帰**(regression)とは、一回りして元に帰る意味ですので、似たような事象がまた現れるという意義に使います。時系列の場合、過去の性質が現在及び未来に影響を及ぼすと言う因果的な性質に使い、周期的な現象があることを指します。**回帰分析**は、一般的には何かの事象を比較して、似た性質を取りだす解析を指し、その発現モデルを**回帰モデル**と言います。例えば、回帰直線を求めることは、グラフ上の多くの離散点が、あたかもその直線に回帰して集まってくるような性質を持った直線モデルを求めると言う意義です。時系列データ自体に周期的な現象があるとき、**自己回帰**(auto regressive)であると言います。この場合、それを発現するシステムを**自己回帰モデル**(AR モデル：Auto Regressive Model)と言います。橋梁振動の時系列解析の主目的は、この自己回帰モデルを橋梁の弾性的な性質に同定させることです。

確率過程の解析

時系列の性質に回帰的な性質がない場合、この時系列は**確率過程**です。この意味は、連続して起こる前後の事象が全く独立であることを言います。典型的な例は、サイコロを振って出る目の並びです。現象としてはランダムですが、その目の出方に確率的な法則がありますので、これを確率分布と言います。幾つかの理想化された**確率モデル**が提案されています。例えば、サイコロを2個使って、目の和の確率分布は二項分布になる、のようにモデル化します。時系列の解析では、元の事象がどのような確率分布に近似するか、を求めることに焦点があります。そうして、特定の事象が起こる確率を推定します。大地震・大風・高波・最高洪水位などが何年周期で発生するかを表す**再現確率**(return period)の計算が一つの応用です。橋梁の解析では、通行する自動車の台数や荷重の方はランダムな性質ですので、確率過程と考えます。大小さまざまな自動車交通がありますが、それは橋梁の疲労設計と関連付ける方向に進んでいます。

ランダムさのクセを確率密度関数で表す

サイコロを振って、次にどの目が出るかは全くのランダムな事象です。例えば1の目が出る確率は1/6です。しかし、これは次の6回目前後に1が出る周期性を意味するものではありません。何かの現象を観察すると、見かけ上、この確率を周期性と誤解することがあります。再現確率は、英語の return period を訳して再現周期とも言いますが、物理的な意味での周期性とは異なる概念であることに注意しなければなりません。サイコロで言えば、1の目が出る確率は1/6ですが、これは6回目に1が再現する周期性を意味しません。もしサイコロにクセがあって、1の出る確率が他よりも大きいことがあるとします。このクセを含めた性質を**確率密度関数**で表します。理論的な根拠に基づく**確率分布**が幾つかあります。例えば正規分布や二項分布が代表的なものです。ランダムな確率過程の解析目標は、その確率密度関数が、どの理論的確率分布に近似するかを求めることです。

スペクトル解析を信用し過ぎないこと

何かの事象を時間の関数として捉える時系列 $f(t)$ は、多くの情報を含みます。**スペクトル解析**は、この時系列に含まれる数学的な周期成分を分離する意義があります。一般的に観察される振動事象の周期性は、回帰的な意義での周期性と、確率過程としての見かけの周期性が混じります。その周期性は、ピアノの弦振動のような正確なピークを持つ周期ではなく、或る幅で揺れがあります。これをスペクトル解析で見ると、中心となる周期を挟んで幾つもの小さな起伏があり、ある幅の裾を持った山が得られます。これが確率的な性質です。電気・電子装置は人工的な装置ですので、理論に合わせたハッキリとしたピークを示すスペクトル波を合成することができます。幅を持たせるスペクトルの典型的な例は、FM放送で使われる周波数変調です。スペクトル解析をすると、幾つものピークが計算されますが、確率の見方からは、全体の山の形状が重要です。

振動応答は多くの周期成分を持つこと

橋梁は弾性的な構造物ですので、外力を受けて変形しても、元に戻ろうとします。これが振動を起こす原理です。一方、砂のような材料は内部摩擦が大きく、元に戻る性質が小さいので、経験的に、砂や砂利は制振作用があることが知られています。鉄道の砂利道床はその応用です。地盤は振動が伝わりまでするので、地盤に弾性的な性質があることの証拠になり、地盤にも固有周期（卓越周期とも言います）が観察されます。外から振動の攪乱力が作用すると、その力学系固有の振動周期があっても、攪乱力の周期に引きずられた振動を示します。これが応答です。そうすると、この応答をスペクトル解析すると、その力学系の固有周期以外に様々な周期が得られます。したがって、応答スペクトルは、確率密度関数と同じような解釈が必要です。つまり、スペクトル分布は、種々の周期現象が含まれているときの周期別の確率分布を示します。

標準的なデータの選別

振動データを解析に載せるとき、細かく見れば同じ現象とは言えませんが、どこを取り出しても大体同じような繰り返し現象に見えれば、統計的には**定常的(stationary)**であるとします。これは、測定データを統計的な処理に載せる場合の標本として、クセが無いことを表す言葉です。しかし、測定作業では、解析効率の上がるように恣意的な操作を加えますので、その制限の下でデータに偏りのない定常性をねらいます。そうすると、重要なデータを取りこぼすこともあります。観察時間を長くすると、別の性質を示すことがあります。例えば、上昇・下降・うねりなどの性質があるとき、これを**トレンド**または**ドリフト**と言います。単純にスペクトル解析をすると、ドリフトは、のこぎり波が重畳した結果で得られます。

二つの時系列を同時刻で比較する

橋梁は、比較的対称性のある3次元的な構造物ですので、同じ場所での上下・左右・前後の振動は異なった性質を示します。通常の解析では、この内の二つを選んで、二つの時系列 $f(t)$ 、 $g(t)$ として個別にスペクトルを求めることも意味があります。複素スペクトル解析（後の章で解説します）を応用する方法もあって、卓越する周期成分と、その振動方向を区別することができます。統計的な数値解析では、**コヒーレンス**(coherence)と**フェーズ**(phase)という数値で与えます。具体的な理解には、例えば、両耳で聴く音は、フェーズの違いで音源の向きが分かるのがそうです。また、二つの時系列事象は、平面座標上で運動する点の軌跡と考えることもできます。周波数ごとに分解すると、或る向きに卓越する振動現象では相関値（コヒーレンス）が大きく得られ、その向きがフェーズです。

因果関係を発見する時間差の相関

振動は、同じ性質が或る時間間隔で繰り返される回帰現象ですので、時間軸をずらしながら波形を比較すれば、重なりが周期的に現れます。これを数学的に行う方法を相関(correlation)と言い、計算方法は標準的な統計計算です。二つの時系列を相関計算に応用するときは、一定時間区間で事象を切り出し、かつ時間差 τ を持たせた $f(t)$ と $g(t-\tau)$ のデータセットで計算し、この時間差(τ)を新しい媒介変数として相関値を表します。これを**相互相関関数**(cross correlation function)と言います。また、同じ事象から時間差を持たせた二つの時系列 $f(t)$ $f(t-\tau)$ を使った相関関数を**自己相関関数**(auto correlation function)と言います。自己相関関数は、 $\tau = 0$ に対して対称なグラフで得られます。また、元の事象がランダムな性質であるか、それとも、ある原因が時間差を持って再現するか、の因果関係を発見する手段に使います。振動現象は、時間差を持った典型的な回帰的現象ですので、周期的な性質が自己相関関数に現れます。構造物のインパルス振動は、一定時間が経てば振動が減衰し、過去の現象とは縁が切れます。これは、自己相関関数で見れば、 τ が増加すると無関係の性質、つまり0に収斂します。この性質を利用して、その構造物の固有振動数と減衰係数を求めることができます。

数値解析では分からない性質が無数にあること

音波は、物理現象としては振動でしょうが、人の声のように連続した振動の並びは言語となり、多様な情報を含みます。複雑さのことを**エントロピー**(entropy)が高いと言うことがあります。一方、スペクトル解析や相関解析などで定量化して引き出す解析は、一種の単純化です。したがって、将来、どのような分析方法が提案されるかは予測できません。基本的なことは、乱雑に見える時系列の中から、ある特定のパターンと相似な現象を見つけ出す、または選り分ける分析にあると考えることができます。そのパターンは、まだ、人の感性の助けを借りて判断することが多くあります。感性による結論は主観的ですので、現状では科学的・客観的な演繹で結論を導く方法とは見られませんので、学術論文としては低く見られ勝ちです。しかし、考え方を変えれば、非常に多くの未解決な学術課題が残されている世界です。そのため、時系列の解析には、理論的には意味がないと速断しないで、思いついた方法を試して見る面白さがあります。

1.3 測定装置の特性と補正

観察と測定の区別

何かの事象を注意して見るのが**観察**(observation)です。これは、やや受身的な態度ですし、観察者の判断や感性が入ります。これを進めて、客観的・計画的・積極的にデータを記録することが**測定**(measurement)です。観測は測定を伴う観察を意味します。例えば、気象データの風速は、最大風速が記録され、部分的に気象の統計データとして理科年表にも記録されています。これは観測データと言うことができます。一方、風の性質は平均風速と瞬間風速の見方があり、細かくみれば風の息と言われる変動を伴います。自然現象としての風は、吊橋の耐風設計などと関連することもあって、その場所で研究目的の測定も行われます。こちらの場合にはかなり目的意識を持って計測されます。気象観測と共に、どちらも風の性質を知るための測定ですが、データ相互に関連が付くようにしておくと比較判断に利用することができます。ただし、公式の統計データの標本は、採用に厳格な条件が付きますので、研究レベルでの一過性の観測値は、参考にはしても公的な統計記録には採用されないのが普通です。

異なった装置で測定されたデータの整合

風速の気象観測を例とすると、平均風速と瞬間最大風速の計測には、以前、測定原理の異なる別々の風速計が使われていました。これが、一種類の測定器の観測に統一され、データ処理から平均風速と瞬間最大風速を得ます。単発的に得られた一つの測定値では、正しさの判断ができませんので、説得力を持たせるために、検定と共に、独立した複数の測定を**傍証**として利用します。そうしておく、比較と比較正をするときに判断ができます。これには種々の方法が応用されています。例えば、同じ事象を複数回測定する；同じ原理の測定器を複数個使う；異なった原理の測定器を並列に計画する；第三者が追試を行う；などの方法が取られます。橋梁の応力測定を例にとると、歪みゲージを複数枚使う；応力と同時に撓みを測定する；などの方法が計画されます。これには計測技術者の経験が反映されます。構造物の振動も、多くの人々が測定したデータが集まることで統計的に意味を持つようになります。これが、測定の標準化を提案する意義です。

比較ができるように補正すること

データを相互に比較するためには、二種類の補正が必要です。一つは、測定器そのものの静的な感度を補正すること、二つには現象の性質そのものを考慮に入れた動的な補正です。例えば風速変動を測定するには、風自身の持つ周波数特性と測定器の方の周波数特性とを勘案しなければなりません。風速は刻々変化しますので、変動が早過ぎると記録が追いつかなくなります。瞬間最大風速であっても、マイクロにはある短い時間単位での平均風速の測定値です。また、10分間平均風速のデータを1分間平均風速に換算して比較したければ、風速変動の性質を研究した上で補正方法を提案しなければなりません。これには推測統計が応用されます。

事象の測定特性は必ずしも線型ではないこと

風速のように、人も観察できる何かの事象を測定すると、必ずしも人の感覚尺度とは比例しません。したがって、科学的な装置による客観的な測定が意義を持ちます。しかし、測定値が2倍で得られたとしても、事象の性質を素直に2倍とすることができない場合も少なくありません。この場合、測定器側に原因のある非線型な性質は別に勘案することとします。非線型性は、例えば、風速が2倍になると、風のエネルギーは4倍になりますので、風圧を測る原理の風速計は、感度の尺度が風速に対して直線的にはなりません。騒音計や振動計のデータも、強さの尺度はエネルギー比のデシベル値で与えます。これらの測定器は、人の感覚尺度に合わせるように周波数の特性を電氣的に補正します。測定器の感度特性が非線型であったとしても、測定データ相互の大小順位は変わりませんので、これを考えた順序統計(order statistic)を応用する補正方法が提案できます。大小順位を保ったまま測定値の感度特性を変えると、事象の測定波形が変わり、スペクトル分布も変わります。このこともあって、前節で説明したように、数学的なスペクトル解析を盲目的に信頼するべきではないとするのです。

1.4 標本の採取と保存

データストリームとデータマイニング

この二つは、以前からもあったコンピュータ用語です。コンピュータ技術、特にインターネットなどの通信技術が普及して、時間的に次から次へと莫大な情報量(データストリーム data stream)が得られるようになりましたので、即座の判断に利用する目的意識を持って、改めて研究されるようになりました。従来のデータ処理は、コンピュータの能力が低かったので、バッチ処理、言い換えればデータのつまみ食い処理しかできませんでした。そうすると、何か重要な判断に必要なデータを取りこぼす恐れがあります。そこで、大量のデータストリームから有効な性質を取り出す技術が必要です。これに、鉱物資源から有用な金属を取り出す意義を持ったマイニング(mining)の用語が当てられました。この課題は、商業活動における意思決定に主に使われますが、科学技術の分野でのデータ処理においても応用を考えます。例えば、連続して撮影されているビデオ画像を、どのようにコマ落とし記録をし、どの時点まで保存し、利用方法を研究するか、などの課題です。

定常事象と非定常事象

地震は何時くるか分かりませんので、地震計は24時間常時稼働させなければなりません。研究目的ならば、地震の前兆を捉えたら記録計を起動させれば効率的です。しかし、地震波の最初の部分を記録できません。それに代わる方法として、記録計の方に工夫をして、現在の測定時点から過去の一定時間までの記録が残るようにループ化したエンドレスレコーダのアイデアがあります。その一例が航空機に搭載されるフライトレコーダです。一定時間以上の過去のデータを消去しますので、データ量が爆発的に増加するのを抑えることができ、かつ、その時間内で起こる非定常な現象を確実に記録することができます。さらに、データ処理の方法にも工夫が必要になって来ました。従来のデータ処理は、言わばバッチ処理です。変動する連続データを或る区間で区切って、静的に捉え、例えばスペクトル解析などを利用しました。しかし、次から次へと変動する大量のデータストリームがあるとき、時間を固定するデータ解析であっても、連続的につないで判断に利用する必要があります。音声解析の声紋は、スペクトル解析を時間的にずらしながら表現する方法です。普通の振動解析に応用するとき、ランニングスペクトル(running spectra)と言います。映画やテレビは動画と言いますが、静止画像の連続です。このとき、変動する画像成分だけに注目するのがマイニングに当たります。

1.5 標本のスクリーニング

スクリーンとフィルタ

電気電子的な測定器で得られる信号は時間的に連続したアナログデータですので、電気回路を通して連続的な処理ができます。音響製品で見られるごく普通の処理に、音量を調整すること、音質を調整することがあります。これがスクリーニング(screening)に当たります。この用語は鉱石の選別の意義を持ち、マイニングの言葉と関連を持ちます。音量調整は、網の目の大きさを変えて通過量を制御することに当たります。音質調整は、信号処理の用語ではフィルタ(filter)を通すと言います。この用語はスクリーンと意義的には同質の言葉ですが、フィルタは事象の変動の性質を考えたスクリーニングを指します。例えば、ハイパスフィルター、バンドパスフィルターなどがそうです。アナログ信号を離散化してデジタル化する標本化は、或る時間間隔の信号値にスクリーニングしたことになり、結果として高周波成分をカットするフィルタの作用があります。また、測定時間を限ると、それ以上の長い周期現象が得られませんので、やはりフィルタの作用になります。

標準処理に載せる準備

スクリーンもフィルタも、データに加工を加える処理です。ただし、その後続く別の処理にデータを繋ぐように使い、そこで何かの成果を得ることが目的ではありません。コンピュータの用語では **FEP** (front end processor)がこの処理に当たります。見掛け上、入力したデータを貯めないで、処理を加えて次に渡します。全体を一つの処理単位で構成するよりも、FEP の部分を取り替えるようにしておく融通が利きます。時系列データセットを数値処理に載せるときは、背景となる元の事象の単位系などを捨象して、生のデータを標準的な数値計算や統計計算に向く整理をします。デジタルデータを扱うときは、アナログデータとは質の違う処理上の問題が起こります。基本的にバッチ処理をつないで、見掛け上の連続処理をさせなければならないことです。

標本個数の制限

時間的に次から次へと送られてくる連続データを解析するとき、ある判断基準を設けて、標本の個数を抑えた静的な解析をし、それを繰り返すことで、動的な性質を表す方法を考えます。長い時間全体のデータをまとめて処理することと比較すると、相対的に処理時間を短く抑えることができ、見掛け上、連続的なデータ処理ができます。例えば、ランニングスペクトルは、スペクトル分布が時間的に変化する様子を表すことができます。この解析手法を事象の実時間に合わせて可能にしようとするとき、一回の解析に使うデータ個数を増やして精密化を図ろうとしても、処理時間がデータ個数(例えば N)に比例しないで、 N^2 や N^3 に比例して増加するようであれば、実時間処理に間に合わなくなる、と言う制限を受けます。

サンプリングの時間間隔

変動する事象の周期的な性質を記録したいときには、その事象で注目すべき最大振動周波数 n と、継続時間 T とを考えて一単位のサンプリング個数を決めます。サンプリングの時間間隔 s は $(1/2n)$ に選びます。サンプリングの個数 N は (T/s) で計算できます。 T の決め方ですが、感覚的に言えば、ある時点での事象の影響が残らなくなるまでの時間です。地震動の解析は、地震発生から振動が収まるまでの時間が一つの例です。この判断には、自己相関関数を利用するのも一つの方法です。或る時間範囲 T を外れた過去もしくは未来のデータ群とは統計的に関係が薄いと判断に使います。そうすると、 $2T$ 秒よりも長い振動周期は解析から外れます。スペクトルの有効解析個数は $(N/2)$ です。振動数の解析精度は $\Delta n = (1/2T)$ になりますので、あまりサンプル数 N を少なくするとスペクトル分布の周波数間隔が粗くなります。また多すぎると計算量が増えます。高速フーリエ変換(FFT)を利用するときは、データ個数を 2^n 個に区切ることも条件に加えます。しかし、橋梁などの構造物の振動を解析するときは、走行する車両が橋梁を通過するまでの継続時間を考えることがあります。このときは、車両の攪乱力が振動を誘起し、それが疲労の蓄積に影響すると見る方にも視点があって、極大値または極小値の起こる回数を求める処理に利用します。

極値データのサンプリング

時間的に変動する連続事象、もしくはめったに起きない特異な事象を記録するとき、時間的な変動の性質を捨象して、**極大値**または**極小値**、またはその両方を標本として残します。この場合、あるレベルに達しないデータを無視します。この問題は、強風・地震・高波などの発現周期を解析するときに行われ、極値統計の手法で研究されています（歴史的な参考文献は例えば：合田良実、「極値統計におけるプロットング公式ならびに推定値の信頼区間に関する数値的検討」港湾技術研究所報告 27-2, 1988-3）。この場合の事象は、時間のスパンが年単位のように長いのが特徴です。一方、構造物の耐久性や疲労強度を研究するときは、ある時間間隔の間に観察された極値の大きさ別の個数、または、その逆数としての平均的な時間間隔に注目します。これは、振動解析とは異なって、現象の捉え方が確率的である違いがありますが、周期性の解析と似ます。構造物の振動測定においては、同じデータから、振動周期などの解析用と、極値だけに注目する解析用とを選択するようなサンプリングが必要になりました。後者の代表的なサンプリング手法に **Rain Flow Method** があります(図 1.1)。これは、現象の記録から単純に極値の回数を記録するのではなく、材料の疲労強度に直接関係を及ぼす極値を選別するように、一種のフィルタをかけます。この標本抽出原理を感覚的に説明するとき、振動現象グラフの時間軸を下向きに置いた図形を多重の屋根構造に見たて、そこに雨水が貯まって屋根先から流れ落ちるようなモデルを遠藤達雄らが提案し、この名称を使うようになりました（遠藤達雄他、「Rain Flow Method の提案とその応用」、九州工大研究報告 1974-3）。

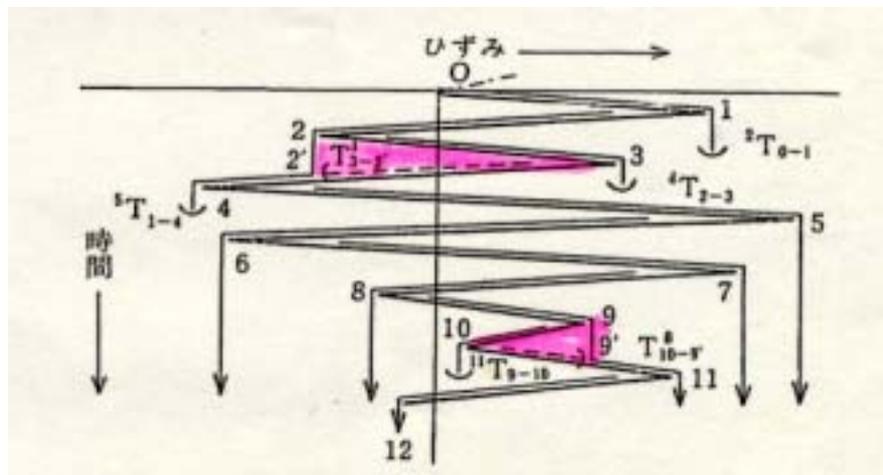


図 1.1 : Rain Flow Method によるサンプリング

2. 時系列データの前処理

2.1 生データの標準化

何も加工しないデータの観察から始める

振動測定に代表されるような時系列のデータは、元々は連続事象（アナログデータ）です。しかし、データの保存や、解析処理に掛けるためには、ある時間間隔でサンプリングし、振幅の大きさも数量化（デジタル化）し、コンピュータ処理を前提としてファイルに記録します。これを生データとします。ファイル化では、元のデータについての5W1Hの情報と、サンプリングの条件などを含めた書誌事項に相当する情報も同時に記録します。最初にする作業は、何も解析処理を通さない生データを、リストに作成するか、グラフに描いて、全体を観察します。通常は、測定現場または後の作業でCRTオシログラムを使って動的に観察する（モニタリング）か、静的な波形グラフを描いて参考にします。経験の有る人が見れば、そのまま、かなりの情報を読み取ることができます。テレビ画像と同期を取ることができれば親切でしょうが、設備が複雑になりますし、再現して観察するだけでも測定時間と同じ時間が必要です。要約に相当する一覧のグラフを描き、その時間軸に沿って、説明が挿入してあると、解析の時に時間の節約ができます。

ファイル保存の標準化もデータ処理であること

データを記録するとき、測定器専用の特殊な保存形式を使うと、時代が変わって、そのデータを再利用できなくなって全滅することもあるのが怖いところです。紙に記録するか写真で残すオシログラムはハードコピーであって、嵩張って場所を取る欠点もありますが、何も特別な道具がなくても読むことができます。電気・機械式の記録は、それを再生する装置がないと、どうにもなりません。このことを考えて、なるべく長持ちして利用できる汎用のデータ保存方法を研究しなければなりません。コンピュータで利用するファイルの種類が進歩して来た歴史には、データの全滅を何度も経験した苦い裏の歴史があります。それを承知の上で、時系列データを、コンピュータ用ファイルに保存しなければなりません。ファイルのデータ形式は、一種類とは限りません。そのデータを利用する解析プログラムに合わせたフォーマットに作り替える必要が生じます。数値データは、バイナリーファイル形式で保存する方が、数字や文字に直したテキストファイルよりも寸法を小さくできます。しかし、ファイルを読み出すプログラムが特殊になります。

Excel ファイルはデータの閲覧に便利であること

Excel 形式のファイルは、そのまま、閲覧目的と単純な統計処理に使える便利さがあります。**平均値・分散・標準偏差**などの計算に組み込み関数が利用できますし、グラフの作成もできますので、簡単なレポート作成ができます。また、Visual Basic などを使ってやや複雑な処理をした結果を、逆に Excel ファイルに取り込んで（インポート：import）、体裁を整える使い方があります。ただし、Excel の表計算機能を使うデータ整理は、Excel 自身もバージョンの違いでデータの共有ができないこともあります。しかし、マイクロソフトの製品が世界レベルで普及してユーザ数が増えたので、逆説的ではありますが、Excel のファイル形式で保存しておく、バージョンが進化してもデータが利用できなくなる危険は少なくなりました。そのため、Excel のファイルに残したデータが生データの意義を持つようになってきました。ただしデータ保存は、二つ以上（256 まで）の事象のデータが扱えるとしても、データ長（行数）は最大 65K（符号なし 16 ビット整数）以内の制限を受けます。さらに、実用的な解析に利用する長さは、16 ビットの符号付き整数の最大値 32K を限度とします。

なるべくファイルの種類を減らすこと

Excel は、多くの利用者の要望を受けて、便利さを採り込むように進化してきました。しかし、振動データの解析のような、特化した目的に使える機能は充分ではありません。豊富な組み込み関数を応用すれば、それなりの解析処理もできます。しかし、もともと対話形式で事務計算のデータ処理をすることを目的としていますので、大量のデータストリームを連続的に処理するには向きません。したがって、測定対象に合わせた専用のソフトウェアの開発が必要です。現状では、他のプログラムでデータ処理に載せるためには、テキスト形式で別ファイルに作成（エクスポート：export）しなければなりません。Excel のファイル自体に生データの意義を持つように扱うためには、データ処理で別ファイルに作り直す手間を省くような、一貫したソフトウェアシステムを開発する必要があります。

基本的な書誌事項

生のデータはファイル化し、保存と管理を考えるには、下のような5W1Hの書誌情報を考えます。ファイル自体の管理にはファイル名・日付・拡張子などの検索目的の基礎的な書誌事項が必要です。

- 表題： 幾つかのファイル群があるとき、全体を総称する表題をつけます。
- 副表題： 個々の事象に名称をつけて区別できるようにします。
- 分類コード： データグループに一連番号を割り振るなどを指します。
- 日付： データ採取日時（when に相当します）
- 場所： データ採取の場所（where に当たります）
- 測定対象： 何のデータを測定したか、例えば橋の振動など（what に当たります）
- 記録方法： 測定機器に何を使ったか、どこで測ったかなど（how に当たります）
- 測定者： 測定に当たった機関名、所属など（who に当たります）
- 測定目的： 表題などで測定目的が分かりますが、分類としては why と考えます

数値データの詳細

デジタル化されたデータの数値処理に必要な環境情報は下のような項目です。

- 並列データ数： Nch: 何成分の事象を同時記録したかの数。
- サンプル間隔： dT: 一定間隔でない場合には時刻データも事象に含みます。
- サンプル数： Np:
- チャンネル ID： 測定種別、単位系（加速度など）を記号で記します。
- データグループ： テキスト形式では、データをコンマ区切りにします。

数値解析をする処理プログラム側では、データを格納するための配列を動的に確保してデータを読み込むようにします。最初の三つのデータは、この動的配列の寸法を確定する目的があります。配列、例えば A(M)、を宣言したとき、配列の基底を 0 からとし、寸法は $M=Np-1$ と約束します。古いバージョンのプログラミング言語の Fortran では、配列の基底が 1 でしたが、現在では 0 が標準になりました。これにより、時刻 0 のデータを A(0) と表記できます。テキスト形式でデータを保存するとき、データの区切り記号（デリミタ）にコンマを使うと、1 事象であっても、データ並びを一行に複数個詰めることができます。行末の改行コードもデリミタとして働きます。この形式では、複数事象のデータグループで、並びがずれると正しい配列の位置関係でデータが格納できなくなる危険があります。また、この形式のテキストファイルではエクセルに正しくインポートできませんので注意が必要です。エクセルでは、一行に複数欄のデータがあるとき、改行コードは文字通り改行だけに機能するからです。チャンネル ID は、測定箇所やデータ数値の単位系の情報を記号で表し、この詳細は書誌事項に含ませません。例えば、加速度記録の場合、測定箇所、向き、単位系 (m/sec^2 または cm/sec^2 の区別など) が必要です。

基礎的な統計量の計算値

時系列のデータに限らず、或る塊のデータを統計処理に載せる前に、データ集合の基礎的な計算値を求めておきます。これを基礎的な統計量と言い、下のような項目です。

- 平均値(mean)： 事象を確率過程と考えるときは、**期待値**と言います
- 分散(variance)： 個々のデータから平均値を引いた値の**2乗平均値**(MS)
- 標準偏差(standard deviation)： 分散をルートに開いた値(RMS)
- 最大値、最小値： 数値の大小範囲を知る目的に使用

推測統計においては、母集団の分散を計算するとき、サンプル総数 Np ではなく、 Np から 1 を引いた数で 2 乗和を割った分散を扱います。Excel では、標準偏差の計算に 4 種類の関数があります。この中で、STDEVP が Np の方で割る数学的な意義の関数です。「データを標準化する」と言うことは、平均値を 0 に、標準偏差を 1 にすることを指します。ただし、平均値は、電気的には直流分ともいい、トレンドの一つの性質です。右上がり、右下がりなどの回帰直線的な傾向や、全体として 2 次以上の曲線的な変動を示す回帰曲線分があるとき、これらを除くかどうかの判断が必要です。スペクトル解析は周期成分を取り出すことが主目的ですので、直量分やドリフトを省く必要があります。しかし、他の見方が必要であることもありますので、生のデータから不用意にこれらを除いてはなりません。

異常値の調整

生のデータを解析に載せる前に、全体をグラフに描いて観察することは、異常値を発見するときに役立ちます。異常値とは、本来の事象の性質から考えて、あり得ない過大または過小な値を指します。何らかの測定時の過誤で異常なデータになったり、また測定器が動作しなかったり（欠測）、感度を越えた過大な信号が入った場合も異常値と言えます。これらの異常値の処理には弾力的な判断が必要です。ただし、あまり予見を入れて生データから削除してしまうのも一長一短です。ランダムで無効に見えるデータについては、微妙な価値判断を伴うことがあります。例えば、グラフに描くと全くランダムに見えるデータも、音として聞くと、雑音の中から重要な情報を聞き出せることがあるからです。これらの情報は、物理的・数学的な処理では発見できなくても、人、さらには動物の感性で理解するからです。この意味で、ランダムデータの解析は、多くの未解決な課題を含むと考えることができます。

2.2 順序統計の利用

測定データは必ずしも事象を正確に記録しない

時系列のデータを測定機器で記録したとき、測定器側の特性を受けますので、データを頭から信用できないものです。ここでは人為的な誤操作を別にします。最も大きな影響は、データの大小が必ずしも事象の強弱と比例しない場合です。例えば、風速は地面に対して相対的な風の速度ですが、測定装置として二種類あります。プロペラ式のような風速計とベンチュリー管やピトー管のように風圧差で測る方法です。後者は風速の自乗に比例した感度を持ちます。また、気圧の影響を受けます。騒音計は人間の体感に合わせたデシベルで表示しますが、これはエネルギー単位での大小を対数化したスケールです。測定原理の異なる複数の事象を比較したいときは、感度特性を調整しなければなりません。数学的調整は、測定値を自乗する・ルートに開く・対数値に直す、などを行います。このようにすることに理論的な根拠はあまりありませんが、元の事象のグラフで見てくれの性質をよくする恣意的な方法です。これはスペクトル解析にも影響し、結果の総合的な判断が重要です。学術レポートでは、この判断部分を所見、Discussionとして独立させ、推測を交えた個人的な判断を書くことが許されています。専門家の判断が必要になるのはこの部分です。

順序グラフによる観察

コンピュータが利用できなかった時代から、データの整理に順序統計は多く用いられてきました。時系列データ個々の並びに順序統計を利用する場合、元の事象を**確率過程**(stochastic process)と仮定します。本来は時間的に連続しているデータをデジタル化し、その並び順を変えて観察するからです。連続事象のデータを並べ変えますので、意味が無い様に思うでしょうが、データの特性を判断するときに役に立ちます。また、前節で解説した異常値を見つける場合にも利用できます。整理は、まず、出現時間を無視し、データを大きさの順に並べ直して、一様増加する**順序グラフ**を作ります(図 2.1)。同じ数値が有る場合には、別の約束を適用しますが、数学的には、あらかじめ乱数を使って各数値に微小変動を加えておけば、一意に順位が定まります。サンプル数が多ければ、横軸を%表示にし、擬似的に連続関数とみることができます。このグラフの利用方法は、或る標本値が、この順序グラフのどの位置にあるかの判断に利用します。統計的には下の表 2.1 のような代表値が利用されます。例として、学校での学業成績順位を考えると、生々しい納得が得られるでしょう。

表 2.1 : 順序統計で扱われる代表値

統計量	解 説
データ個数	サンプル個数が多くなると順位の番号の代わりに%で考えます。
最大値	時系列には極大値は複数ありますが、順序統計での最大値は一つです。
最小値	最大値とは大きさの見方が反対です。絶対値を扱うときは0の判断が必要です。
中央値	サンプル個数の半分の位置での値です。4分の1点なども参考にします。
最頻値	回数の多いデータ値を指すのですが、1ヶ所だけとは限りません。

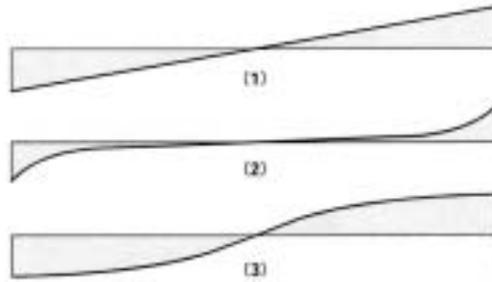


図 2.1 : 典型的な三種類の順序グラフ (平均値を 0 にしてあります)

順序グラフの曲線形の性質

複数のデータグループを順序グラフにして統計的に比較したいときは、順序グラフの図形的な特徴、特に両端と中央の形状に注目します。典型的には、図 2.1 に示したような三種類の形状モデルがあります。このグラフは、平均値が 0 になるように、左右逆対称で、高さの差が 1 になるように標準化したと考えて下さい。例えば、小学校の 1 年生から 6 年生までの生徒は身長差が大きいので、身長順に並ぶと頭の高さの並びが、図 1-(1) のように、ほぼ直線的な順序グラフを描きます。成人では身長差が小さくなりますので、図 1-(2) のように全体として平坦で、両端で例外的に少数のノップとチビが居る形状を示します。図 1-(3) は、(2) と反対に、スポーツ選手の集団のように、例外事例が少ない、クセのない統計的な集合になります。

頻度グラフ

順序グラフはあまり実用されませんが、ヒストグラム (histogram) の方は良く見られます。これは、順序グラフを作成しておいて、データ値の大きさの範囲を決めてグループに分け、そこに属するサンプル数を計算し、棒グラフ で表したものです。別名で頻度グラフ または 度数グラフ と言います。ヒストグラムを作成すると、山になる極大値の箇所が複数見られることがありますので、実用的にはグループ分けをあまり細かくしません。しかし、数学的に理想化した滑らかな頻度グラフを考えることができます。これは、順序グラフを微分した形になります。図 1 をもとに、頻度グラフの傾向を模式的に図示すると図 2.2 のようになります。

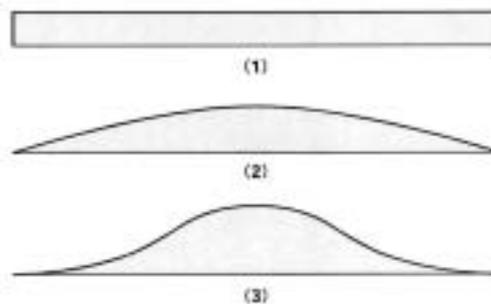


図 2.2 : 典型的な三種類の頻度グラフ

頻度グラフを理想化したモデルが確率密度関数

図 2.2 の頻度グラフの作成にあたって、サンプル数を大きくして理想化したモデルが、統計処理に用いる確率密度関数です。或る法則に基づく理想的な確率過程を表す数学モデルが幾つかあります。図 2.2 と同じように左右対象であるものには、標準正規分布・t 分布、非対称なものには、カイ自乗分布・ワイブル分布などがあります。これらの確率密度関数は、横軸を事象の大きさにとり、標準偏差を 1 に正規化し、グラフの面積が 1 となるように与えます。このグラフを積分した関数を累積確率密度関数と言い、0 から 1 まで一様増加する関数であって、順序グラフに当たります。図 2.2 の(1) のような確率分布は、一様なランダム事象を表します。例えば、さいころの目の出る確率がそうです。数値計算で、一様乱数を発生させたデータも、頻度グラフは、ほぼ水平な直線で得られます。

データ数値を加工するとグラフが変わること

確率過程を統計解析する目的の一つは、データの統計的な性質が、どの確率密度関数に近似するか、に焦点があります。この場合にはデータ数値に何も加工を加えないことを前提としています。しかし、この節の最初に説明したように、データの大きさの順序を変えないで、順序グラフの形状、および、頻度グラフの形状を恣意的に変えることができます。したがって、逆に、ある確率密度関数に近似するようにデータ数値の大きさを変えることが考えられます。統計処理の研究では、一様乱数のデータを加工して、或る確率密度関数の性質をもたせてシミュレーションをすることがあります。コンピュータを利用するデータ処理が便利になってきましたので、物理モデルが未知の確率過程を、無理をして難しい数学的な確率密度関数モデルに同定させる努力よりも、元データの大きさの方を操作して、例えば正規分布に合うように変換することができます。世俗的には下に述べるような下駄を履かせる処理があります。

下駄を履かせる調整

学校の定期試験を採点するとき、配点の具合が悪くて点数の配分調整をすることを、俗に「下駄をはかせる」と言います。正規分布になるように、配点の順位を保ちながら、最高点を 100 点に、クラスの平均点と中央値を 75 点にする、などの凝った調整をすることがあります。順位を保ちながら、元のデータの値を自乗したり、ルートに開いたり、一定値を加算または減算する、などの方法を使います。変換を数式で与えると処理が機械的にできます。これは、順序グラフが偏った形状になっているのを、あらかじめ決めた特性になるように、順序グラフの形状を調整していることに当たります。この調整はかなり恣意的ですが、数学的な衣を着せることがあります。どの数式が良いかを吟味する研究もありますが、どちらにしても理論的、物理的な意義はありません。

時系列データの順序グラフの性質

振動現象のように連続した時系列データを解析する場合、データの周期性や順番を無視する順序統計を応用することは、従来、殆ど考えませんでした。しかし、時系列データも等間隔のサンプリングで離散値として得られますので、順序統計の数値処理に載せることができます。そうすると、順序グラフの形が簡単に得られ、隣り合う数値の差分を計算することで微分もできますので、頻度グラフも得られます。そこで、信号解析のフーリエ解析の例題で扱う幾つかの信号波形を例題として、順序グラフを描くと、興味のある性質が見つかります。例えば；

- 三角波・のこぎり波の順序グラフは、どちらも斜めの直線です (図 2.1-(1))
- 白色雑音 (white noise) の順序グラフは、ほぼ水平な直線です
- パルス (または δ 関数) の順序グラフは、一端に信号が偏ります (図 2.1-(2) の特別な場合)
- 正弦波など、定常な周期性のある信号の順序グラフは、図 2.1-(3) のようになります
- 減衰振動の順序グラフは、図 2.1-(2) のように、両端が大きく得られます

順序グラフの性質を変えるデータ加工

後の章で解説するフーリエ変換は、時系列から周期性のある性質を引き出すデータ処理です。しかし、現象によっては期待と異なる結果が出ます。例えば、パルス状の δ 関数は、強度が一定である無限に多くの正弦波を、フェーズを揃えた重ね合わせで得られます。しかし、白色雑音は、フェーズの揃っていない正弦波の重ね合わせです。この二つは、周期成分では見かけ上同じ性質ですが、順序グラフの性質が全く異なります。元のデータに、順序グラフの性質を変えるように (下駄をはかせる) 振幅強さに加工を加えると、スペクトル分布も変わります。

2.3 数値積分の利用

振動測定用センサーは加速度型が多いこと

構造物の振動測定に使われるセンサーは、殆どの製品で加速度検出型が用いられます。原理的には、力を電気信号に変換できればよいからです。構造物の振動測定用には、タワミのような静的な成分も測定したいので、歪みゲージ式のセンサーが適しています。感度の検定は、重力の加速度を測定することで、簡単に得られます。ただし、上下方向の振動を測定するときには、重力加速度を直流成分として初期値から除く必要があります。機械振動を測定する場合には、構造物に較べて振動数の高い範囲を対象としますので、音響製品を応用する加速度計が実用されています。この測定センサーは、周波数の低い方で感度が下がり、重力などの直流分は測定できません。音響製品のスピーカーに使われている動電コイルを使う振動計センサーは、速度型です。これは、内部に磁石を使いますので、加速度計に較べてやや大型になります。変位型のセンサーは大型の地震計が代表的です。これは電気が使えない環境で、純粹に機械的な方法で振動を記録できますが、データをデジタル化するのに手間がかかります。光学的なセンサーを使うと非接触型の変位計も提案できます。変位型のセンサーは構造物の振動測定原理としては理想的ですが、不動点が必要であって、それとの相対的な変位を測ります。ところが、現場では不動点に選んだ場所も振動の影響を受けることも多いことが難点です。

センサーの周波数特性

振動を計測するセンサーは、それ自体が力学的な振動システムになっています。そのため、センサー自体に固有振動数があり、強制振動を受けるとその振動応答特性に比例した信号を出力します。この振動システムに適当な減衰機構を付けることで、或る周波数区間で一定の感度を持つセンサーが得られます。この総合がセンサーの周波数特性です。周波数の高い方で感度は、センサーの固有振動数を越えると下がります。低い方の感度は、加速度型・速度型・変位型のセンサーの順で上がりますが、不動点をセンサー内部に組み込めないで、全体として周期の長い方の感度が下がります。特に超高層ビル、長大橋、地盤特性などは長周期の振動成分が重要ですが、測定データを数値解析に載せて間接的に求めなければなりません。音響振動にも低周波振動が問題になります。通常のマイクロホン式のセンサーを使う騒音計は、気圧変化に相当する低周波振動には感度がありません。

高い周波数をカットし低い周波数の感度を上げること

構造物の振動現象は、周波数で言えば直流分から、せいぜい 100Hz までが対象です。100Hz または 120Hz は、家庭電気製品でトランスなどからブーンと聞こえる電源ハムと呼ばれる振動です。機械振動では、1 分間の回転数 (RPM) で判断しますが、これは 5~6000 RPM に当たります。加速度型のセンサーは、周波数の高い方に感度が上がりますので、高い周波数成分を除くようにしないと、測定したい周波数成分が雑音の中に埋もれてしまいます。この方法として、測定器に電子的なローパスフィルタを組み込むか、センサーの周波数特性を改善するようにサーボ機構を採用する製品があります。速度、さらには変位を測るセンサーがあれば、低い周波数での感度を相対的に上げることができます。そのため、加速度計のアナログ出力を電子的に積分することが考えられますが、この積分器は安定が悪いので測定器としては実用に難点があり、価格も高くなります。デジタル技術が進歩してきましたので、単純な加速度センサーを使い、デジタル化して得られるデータを信号処理することの方が扱い易くなりました。

数値積分を応用するのが実践的であること

パソコンの利用が便利になりましたので、単純な加速度型のセンサーで測定したデジタルデータを数値計算で積分して、速度データ、変位データに変換することが簡単にできるようになりました。この実践的な数値積分は、測定データのある時間区間で区切り、ドリフトが出ないように調整をしなければなりません。例えば、加速度から速度に変換する数値積分は、加速度データの平均値を 0 に戻せばドリフト分を除くことができます。速度から変位を数値積分するとき、同じくドリフトが出ないように調整しなければなりません。このように数値積分は、元の力学的な性質と少し異なった結果が得られます。その原因は、センサーの感度特性が必ずしも線形ではないことも影響してきます。例えば、正側負側のグラフが 0 軸に対して対称になっていないときです。この影響を補正するための一つのヒントは順序グラフにあって、前節で説明した「下駄を履かせる調整」を行いません。この場合の調整は、物理的な意義があります。

サンプリングの切り直し

話が後先になりましたが、振動データのサンプリング周期 s は、1.5 節のサンプリングの時間間隔で説明したように、解析したい最高周波数 n を考えて $s=1/2n$ で決定します。測定データを解析に載せるとき、測定時のサンプリング周期とは異なったデータ集合に直したいことがあります。サンプリング周期が千分の一秒(1ms)である場合、このデータを間引いて 5ms、10ms のデータ集合に直すことは簡単です。間引くことは、解析周波数の上限を下げます。また、ピーク値だけに注目して間引く Rainfall 法のサンプリングもあります。このように、せっかく測定したデータを間引きする整理法は、実践的には望ましい方法とは言えなくて、最初から目的を定めてデータを採るように計画し、不必要なデータ量の爆発的增加を抑えます。反対に、サンプリングの時間間隔よりも短い間隔でデータに切り直したいことも起こります。このようにしても、解析精度が高い周波数側に伸びることはありませんので、単純に処理するときは、直線補間を使います。滑らかな曲線を当てはめる方法は、数学的または図形的にはスプライン補間と言われる処理ですが、この問題についてはここでは扱いません。

2.4 汎用測定システムの提案

標準化システム提案の意義

測定したデータに種々の事前加工を加えることなしに、すぐに実用的なデータ処理に利用できるようにすることは、全体のシステム設計において非常に重要な考え方です。研究目的の段階では、種々の可能性を調べますので、前処理も本処理も表に現われるようにします。しかし、一般の人が利用する汎用のシステムを提案するときは、なるべく選択の種類を減らすように、最初から幾つかの前処理をシステム側に組み込んでおきます。これは、測定システムの標準化を提案することになります。扱い易いシステムは汎用性が上がり、多くの需要が見込まれ、結果として測定システムの価格を下げる方向に進みます。さらに、多くの人の測定データを集める機会を提供することになりますので、それらを統計的に整理することができて、結果的に測定データを客観的に評価することができます。具体的な例としては騒音計があって、計器の仕様から測定方法に至るまで JIS に規格化されています。振動関係では、問題がやや複雑ですので、まだ規格化には至っていません。

構造物の振動は 3 成分同時測定を標準とすること

自動車に代表されるような機械部品の振動は比較的周期性が明確ですので、一方向の振動成分を測定する一つのセンサーを使い、向きを適当に変えた複数回の測定方法が実用になります。構造物の振動や地震時の地盤の動きなどを測定するときには上下動と水平二方向とを合わせた 3 方向の動きを、同期を取って測定するのが基本です。橋梁の場合には、上下動の性質が重要です。橋軸方向・橋軸直角方向の振動レベルは相対的に小さいのですが、それぞれに個性的な振動の性質があります。一方、建築構造物においては、2 方向の水平動の性質が重要です。動力学的に言えば、ある場所の運動には回転成分を含めた 6 成分を考えるのですが、回転運動を計測できるセンサーは、ジャイロコンパスを応用するなど、特殊になります。橋梁の振動では、幅員の広い橋の左右揺れ成分を求めることが回転に当たります。実践的には、二箇所での上下振動の対を使えば回転成分が得られます。少し不経済に見えますが、3 成分単位のセンサーを複数箇所に配置して、同期を取る測定をすることで回転成分を引き出すことができます。

センサーの感度特性

振動を捉えるセンサーは、取り扱いにかなり神経を使います。それは、振動を感知する部分自体が振動系になっているためであって、その振動部をロックしなければ、運搬中も内部的には作動状態になっているからです。歪みゲージ式の加速度センサーでは、重力(直流成分)の計測もできますが、乱暴な扱いは禁物です。圧電式のセンサーは、かなり乱暴な扱いにも耐えますが、低周波成分から直流分にかけて感度が低下します。したがって、汎用の加速度センサーは、運搬中の衝撃などに備える設計が必要です。そうすると感度が犠牲になりますので、微小振動の測定は、増幅器(アンプ)の方で調整します。このアンプはかなり大きな増幅率が必要になる直流アンプですので、時間的に安定して機能する性能を持たせる設計が必要です。

持ち運びが便利であること

一昔前の振動計測のハードウェアシステムは、かなり大袈裟でした。測定器や記録計は 100V の商用電源を使うことが前提でしたので、現場に出かけて測定することに制限を受けました。電子機器が小電力で動作し、かなりの機器が電池でも機能するようになりました。しかし、記録計は磁気テープ式のレコーダを利用するなど、自動車のバッテリー電源のようなパワーが必要でした。最近では、デジタルカメラのような、小型で大容量のデジタルメモリが記録装置に利用できるようになりましたので、モータを使うようなメカニズムが必要でなくなり、全体の測定システムは乾電池駆動でハンドバッグに納まるほどに軽量小型に作製できるようになってきました。この技術開発の経過は、磁気テープを使うウオークマンがメモリスティックを使う方式に進化してきた経過と重ね合わせれば理解できるでしょう。構造物の振動測定の場合、人が行ける場所であればどこでも測定が可能な時代に移行しています。パソコンもモバイル型で持ち運びができますので、ハードとソフトの両面で可搬化が進んでいます。

作業性を考える必要があること

小型軽量化は一つの流行でしょうが、構造物の現場での作業性を考えると、室内での利用とは違った仕様が必要です。それは、手袋をはめても操作ができること、操作手順が単純であること、モニタ表示が見易いこと、防水・防湿・耐衝撃が必要であること、などがあります。携帯電話やパソコンは欲張って高機能を謳い文句にすることが多いので、この感覚を持ち込むと、返って扱いが難しくなります。したがって、大衆化する測定システムは、意図的に仕様を制限するのがプロフェッショナルの感覚です。この節での基本的な提案は、「3成分の測定ができること」、「サンプリング周期は5ないし10msで充分であること」です。時間的に連続して記録を採る場合、エクセルファイルでデータを整理するときにはデータ個数に 65K の上限がありますので、約 10 分の連続測定が最長の一単位です。スペクトル解析に利用するデータ個数はこれから選択的に 2^N 個 (1024 ないし 4096 程度) を選びます。そうすると、解析単位の振動記録長さは 10 ないし 40 秒です。詳しいデータ解析は条件の整った室内作業で行なうとして、測定データを現場で簡単にモニタリングができるソフトウェアが必要です。それを見て、データの採り直しなどの判断を決定します。このように、1 箇所での測定が短時間で済みますので、場所を変えて何箇所も測定が可能になります。データ量が増えると、整理・解析にも時間が掛かりますので、流れ作業的なデータ処理解析のソフトウェアが必要になります。

3. 相関解析とスペクトル解析

3.1 相関関数

最小自乗法と相関計算とは親戚関係にある

二つの図形または関数図形が似ていることを調べるとき、二つの図形を重ね合わせて比較します。このときに、**ズラ**すと言う操作をしながら、**重ね**る、ことに注目すれば、この節の主題の一つである相関解析の手法を理解し易いでしょう。二つの図形が似ていることを定量的に求めるとき、あらかじめ大きさを**標準化**しておいて、二つの図形を重ね、対応する二点間の距離を計算します。適当に図形をズラしながらこの計算を繰り返すと、完全に同じ図形であれば、すべての対応点間で測った距離の和が0になります。似ている場合には極小値が見つかり、この大きさが、似ていない場合の尺度です。この原理を応用したものが**最小自乗法**であって、ズラ操作に偏分を応用します。一方、似ている場合に極大または極小値が見つかる計算方法もあって、これが**相関係数**の計算に当たります。最小自乗法では距離の差に注目しましたが、相関係数の計算では距離の積を計算します。実は、距離の差を計算するとき、対となる座標の組 X, Y から $(X-Y)^2$ を計算するのですが、積の形である XY の部分が極大に計算されることが、似ていることを表す係数です。二つの時系列事象の比較は、相対的に時間軸を**ズラ**して相関係数を計算します。この時間差を time lag (τ) と言い、これを媒介変数として相関係数を表したものが相関関数 (correlation function) です。この計算において、元の事象の単位系のまま計算した関数を**共分散関数** (covariance function) と言うのですが、無次元化した相関関数の方が一般的です。

自己相関関数と相互相関関数

二つの時系列 $f_1(t)$ と $f_2(t)$ とを離散化したデータを使って相関関数を計算する式は、生のデータではなく、自乗平均を1に標準化したデータを使います。時系列の自乗平均は、平均のエネルギーレベルを表す物理的な意義があります。算術平均を0にする標準化は、元のデータの性質を考えて選択する必要があります。統計処理では、自乗平均ではなく、算術平均を0にして自乗平均を計算する分散とそれをルートに開いた標準偏差を扱いますので、注意が必要です。相関係数の原理的な式は、離散値の並びで表した時系列を使って、下のようになります。この式は関数を離散値として与えるときの数値計算式であって、数学式は積分で表します。なお、統計処理で扱う相関値は、平均値を0に引き戻した関数値を計算しますので、この違いを注意しなければなりません。

$$C(\tau) = \frac{1}{(N+1)} \sum_{t=0}^N f_1(t) f_2(t+\tau) \quad (3.1)$$

いま、 f_1 と f_2 が同じ事象であるときの相関関数を**自己相関関数** (auto-correlation function)、別であるときを**相互相関関数** (cross-correlation function) と言います。自己相関関数は、 $C(0)$ が最大値1の偶関数になり、時間軸がずれると絶対値が1より小さく得られます。元の事象に周期的な性質があると、或る時間差ごとに相関関数に極大値または極小値が現れますので、自己相関関数をグラフに描いて観察すると、事象に含まれている周期的な性質が分かります。相関関数を計算すると、元の事象にある白色雑音成分を除く効果があります。

スペクトル解析は三角関数との相互相関計算である

或る関数をフーリエ級数で展開するとき、個々のフーリエ係数は、注目している三角関数と元の関数との相関係数を計算しています。比較に使う三角関数を周期別に級数として準備し、この相関係数を、周期を横軸にしてあらわしたものがスペクトルです。したがって、相関解析とスペクトル解析とは同質の統計的な処理です。このとき、三角関数が持つ特別な性質の中で、周期の異なる三角関数間での相互相関値が0になるような関数シリーズ (級数) を利用します。これを直交する級数と言います。ある区間に限定した図形的な関数をフーリエ級数で表すとき、直交する三角関数群には正弦関数 (sine) と余弦関数 (cosine) とを使います。しかし、振動解析に応用するとき、解析区間を限るのは任意ですので、同じ周期の sine と cosine の相関値を一つに合成します。この絶対値の大きさを表したグラフがフーリエスペクトルです。しかし物理的には絶対値の自乗をグラフ化したものが使われ、これをパワースペクトル、またはエネルギースペクトルと言います。これは、振動の運動エネルギー分布を周波数別に分類して表すことになることから、そう呼ばれます。

相関関数とパワースペクトルは相互に変換できること

式(3.1)を自己相関関数として使うと、同じ関数の二次式、つまり自乗の形を持ちます。いま、元の関数をフーリエ級数の和で表したとすると、式(3.1)の計算は、成分三角関数に時間差を考えた自乗項の和で表すこととなります。パワースペクトルは、同周期のフーリエ係数の自乗和をグラフ化したものですので、自己相関関数とパワースペクトルとは、同じ数学的な関係を別の表現で表したものになり、数学的には相互に変換して一方から他方が求まります。この変換の理論的な説明はここでは省きます。参考文献として次のものがあります(日野幹雄、「スペクトル解析」、朝倉書店、1977)。構造物の振動解析においては、固有振動の周期を分析することと共に、減衰の性質を知ることが重要です。この目的には自己相関関数のグラフを必要とします。どちらも原理的には式(3.1)の形で計算しますが、スペクトル解析では高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform; FFT)が便利になりましたので、計算時間が短縮できない一般的な自己相関関数の計算を敬遠することが多くなりました。数値計算技術の面からは、パワースペクトルから自己相関関数を計算できます。ただし、計算速度の向上を目的としてFFTを利用する場合、サンプル数は2のべき乗に制限されます。

3.2 確率過程の現れ方

理想的なランダム確率過程

時間の経過を媒介変数とした時系列は、周期的な性質とランダムな性質とがない交ぜになっています。このうち、周期性のない事象の中に、何かの確率的な性質があるものが**確率過程**です(1.2節参照)。そこで、何かの時系列の発現事象が全く周期性を持たず、クセのない理想的な事象を考え、これを**白色雑音**(white noise)と言います。ランダムな現象をグラフに描いて観察すれば、見かけの上で大小さまざまな波形を示しますので、幾つもの周期的な成分が含まれていることが分かります。すべての周波数に渡ってこの周期成分の強さを数学的に求めたとき、どこにも、目立つ周波数(強弱とも)がなければ、この時系列はランダムであるとしめます。ランダムな確率過程は、或る瞬間の事象と次の瞬間の事象とが無関係に起こりますので、自己相関関数 $C(\tau)$ で見れば、 $\tau = 0$ での値以外は実用的な精度で0と得られます。そうすると、自己相関関数は、ランダムな成分を消去して周期成分だけを残す計算になります。スペクトル解析をするとき、相関関数を計算して、これからスペクトルを求めると、ランダムな影響を小さくできる利点があります。

自己相関関数は有効なデータ個数を決める判断にも使う

構造物の振動は、機械部品の振動とは違って、ランダムな性質が大きく現れ、周期的な性質が隠される傾向があります。ランダム性は、地盤などから伝えられる雑音的な振動と、吊橋や高層ビルのような大きな構造物では強風が自然の攪乱力になります。橋梁や小規模の住宅などでは、通過する自動車交通がランダムな攪乱力を与えます。これらの攪乱力は、構造物に対して衝撃外力(インパルス)の性質を持ちますので、構造物の振動応答を自己相関分析にかけると、インパルス応答が強調されるようなグラフが得られます。これはその構造物の減衰振動を示しますので、ある時間経過(T秒)で0に収斂して行きます。このことを考えると、相関関数の時間軸は、このT秒を一つの目安にすることができて、その解析に載せる元のデータ長は、最小で2T秒であればよいこととなります。ランダムな攪乱力にも見かけの周期性を持つ場合がありますので、実践的には単発的にデータ解析をするのではなく、相関関数も時間的に連続して相対的に観察しなければなりません。一方、減衰が小さく、周期現象が比較的明瞭である事象は、Tが長くなりますので、最初からフーリエ解析に載せる方が能率的です。

散布図は相互相関を視覚的に理解できる

橋梁の振動で、上下動と水平動などのように別の時系列を比較するとき、相互相関関数の解析結果をグラフ化して見るのも一つの方法です。自己相関関数のグラフに比べると、あまり特徴的な性質がありません。むしろ、元の二つの事象を選んで散布図に描く方が感覚的な理解に役に立ちます。例図は後の章で示します。橋梁の振動は、上下振動と横方向の振動とは、独立な成分と共に相互に成分が混じって測定されます。この区別をしたいときには、相互相関のグラフよりも、周波数別に散布図を作成する方が有効です。スペクトル解析のように周波数別に分解し、同じ周波数ごとの位相角を求めると、どちらの向きに卓越した振動であるかが分かります。この解析には、複素フーリエ変換が応用できます。

3.3 図形の解析か周期性の解析か

フーリエモデル

フーリエ変換を応用する解析は、大きく分けて二つの目的に分かれます。一つは、ある有限長さの区間の関数図形に注目し、その**図形の特徴**を、三角関数の重ね合わせで表そうとすることです。もう一つは、**周期的な性質**に注目した解析です。どちらも、便宜的に媒介変数を時間にとった連続な時系列事象 $f(t)$ でモデル化し、それを部分的な時間区間 T で切り出した関数で扱います。その区間に、 2π 周期が整数個含まれるような三角関数 $\{\sin(2\pi kt/T), \cos(2\pi kt/T); k=1, 2, \dots\}$ の重ね合わせで表すことを考えます。この式の整理の形を、説明をするため、便宜的に下のような二種類で考えます。

$$f(t) = \sum_{k=0} (a_k \cos 2\pi kt/T + b_k \sin 2\pi kt/T) \quad \dots (3.2)$$

または

$$\begin{cases} f(t) = a_0 + \sum_{k=1} c_k \sin(2\pi kt/T + \alpha) \\ c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \end{cases} \quad \dots (3.3)$$

式の表現は考え方を整理するために使い分ける

式(3.2)と式(3.3)は同じ事象を表しています。式(3.3)の方は、二つの係数 a_k と b_k の代わりに、振幅の大きさ c_k と位相角 α を使って変形したものです。この表現は、事象に含まれる定数部分（平均値）を外に出し、振動現象部分の振幅の大きさ c_k を強調しています。式(3.2)の方で解析しておけば、式(3.3)の c_k が計算できます。ただし、位相角の方は、あまり利用しません。事象が電気信号の場合、定数部分 a_0 を直流成分と言います。元の事象の周期的な性質だけに注目して解析する場合には、データから直流成分を省くように事前に整理します。数値計算では、サンプルの平均値を求め、サンプルの数値から平均値を引いた値を新しいデータに差し替えて処理に載せます。

フーリエ変換と逆変換の意味

式(3.2)または式(3.3)のままでは k が順序数ですが、同じ事象でも、もし区間 T の長さを十分に長く選べば、 k に整数ではなく実数を当てます。その極限として、 a_k 、 b_k 、 c_k は、 k を連続変数とした関数と考えることができます。記号に k を使うと整数のイメージを持ちますので、これに代えて周波数（または周期＝周波数の逆数）を媒介変数の単位にします。これが**スペクトル関数**の意義です。フーリエ変換は、 t を媒介変数とする関数から、 k を媒介変数とする関数へ変換することを言います。したがって、数学的にはスペクトルから元の事象を再現するような逆変換が考えられます。これをフーリエ合成または**逆フーリエ変換**と言います。このときは、式(3.2)の係数 a_k と b_k をセットで扱います。数値としては正負の符号を持ちますので、単純に**スペクトル**と言うときは、正の係数 c_k をグラフ化して**フーリエスペクトル**と言います。この値はルートを開いた表現ですが、工学的には2乗のままで図に表すことがあります。これが**パワースペクトル**、または**エネルギースペクトル**です。例えば、風速変動の記録をスペクトルで表す場合、エネルギーに換算するときは風速の2乗を単位とするからです。ただし、 c_k を使って逆変換をするときには位相角のデータが必要ですので、これを無視した単純な逆変換は元の事象とは違った波形を合成します。

時間的には同じ現象の繰り返しとする

時間 t を媒介変数とする連続的な時系列の事象 $f(t)$ に含まれる周期的な成分を解析するとき、実践的な数値計算は、一定の時間間隔 Δt で m 分割してサンプリングし、 $T=m \times \Delta t$ の長さの継続時間を考えます。考え方としては、 T の方を決めて、分割間隔を粗くするか密にするかを m の個数で判断します。サンプリングする m 個の離散値は、時間座標に相当する番号を、0 から始めて $(0, 1, 2, \dots, m-1)$ と当てます。数学的には、 m 番目のデータからは再び0からのデータが繰り返されると仮定しますので、元の事象で見れば、両端に当たる $t=0$ と $t=T$ でのデータ値が同じであることを仮定しています。しかし、図形の特徴を調べる目的でフーリエ解析を応用するときは、 $(m-1)$ 番目と m 番目とで関数値が不連続になることもあります（図 3.1）。これは、フーリエ解析の結果を乱す原因の一つですので、数値解析では種々の実践的な試みが工夫されています。

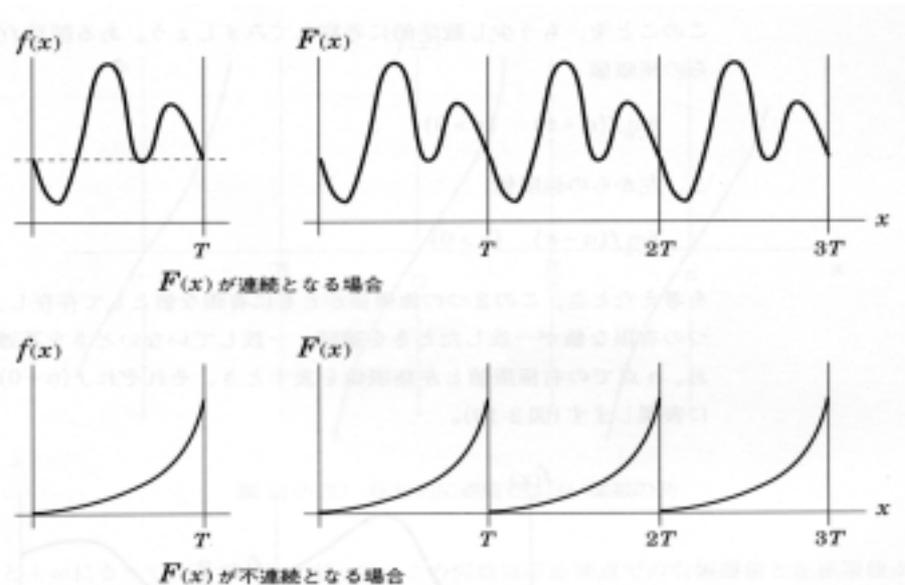


図 3.1 : 理論的なフーリエ解析で考える繰り返し時系列モデル (小川から採図)

離散値でサンプリングするときには注意が必要

式(3.2)に注目する解析は、一対の係数 a_k と b_k とを求めることに焦点があります。この係数が与えられれば、元の図形を正しく再現合成することができます。連続関数を理論的に扱う場合には、和(Σ)を計算する番号 k は 0 から ∞ までです。実践的な数値計算は、有限区間を一定間隔の座標値で区切って m 個の離散値でサンプリングします。サンプル数 m を大きくすれば、より正確な解析が得られる理屈ですが、計算量の増加を抑えるために個数を制限します。これを使って数値計算をする場合には、係数 a_k と b_k との総個数が m 個になりますので、番号 k は 0 から約 $m/2$ までです。数値計算をする場合、 k 番目の係数は、連続関数の同じ番号の係数と一致するはずですが、 $m/2$ 番目以上の高い周波数の振動は解析の対象から外れます。これより高い振動成分が元の事象に含まれていると、一つ以上の波を飛び越えてサンプリングされることが起こり、見掛け上低い周波数の振動と計算される現象が起こります。これを**エイリアシング**(aliasing)と言い、その現象が起きる最低周波数を**ナイキスト**(nyquist)周波数と言います。したがって、 $m/2$ 番目以上の高い周波数の振動波形分を元の事象から除くように測定を記録しなければなりません。実際の測定記録では、このような調整ができませんので、サンプリングされたデータに高調波分の誤差が重畳します。また、 k 番目と $(k+1)$ 番目の中間にあるような周期振動は、両方にまたがる振幅が計算され、なおかつ、或る範囲に裾を持つように広がったスペクトルが得られます。これを**ゴースト**(ghost)と言います。スペクトル図の見栄えを良くする恣意的な目的で、ゴーストの影響を抑える実践的な数値計算法も工夫されています。

周期成分の強さだけに注目するとき

元の事象の周期的な性質を取り出すだけの解析は、サンプルとして取り出すときの継続時間 T の開始時期 $t=0$ を、どこで始めるかには、特にこだわる必要がありません。余分なデータを含ませないようにも注意します。ランダムな事象の解析がそうですが、意味のあるデータが取り出せるような吟味が必要です。数学的には、元の事象から取り出した波形は、 T を周期として連続的に繰り返される連続波形モデルを仮定します(図 3.1)。そうすると、この連続波形から、任意の開始時間を決めて、同じ継続時間 T で再度サンプリングデータを取り出しても結果は同じです。しかも、波形全体の上下を逆にしても、また、時間の進行を逆向きにしても、結果は同じです。しかし、図 3.1 の下にあるように、元の波形で $t=0$ と $t=T$ の波高に極端な差があると、現象としては、直流分、時間的に一定割合で増加または現象するドリフト信号 (またはトレンド)、それと階段状のステップ信号が重畳されます。フーリエ解析は数学的には線型演算ですので、この影響を打ち消すように「のこぎり波」成分を別に考え、この影響を引くデータ加工を行うのが勝ります。これは物理的な意義よりも数学的であって、処理はかなり恣意的になりますので、スペクトル図形を判断するときには注意が必要です。

3.4 複素フーリエ変換の図形的な理解

三角関数の複素数表現

三角関数を図形モデルとして表すときは、中心を原点に置いた単位円上を移動する点の、座標軸への投影です。原点から移動点を結ぶ線分を**動径**と言い、**ベクトル**の扱いをします。ベクトルと x 軸の正の向きとの成す角度 θ を変数に選び、移動点の x 軸への投影を $\cos \theta$ 、y 軸への投影を $\sin \theta$ で表します。この二つの三角関数をまとめて表すため、y 軸の尺度を虚数に選んだ**複素座標系**を考えます。複素平面上の点の位置を表す変数は、通常使う二つの実数変数 (x, y) ではなく、式の扱いでは、見掛け上一つの**複素数** $w = (x + iy)$ に集約して表します。複素数は、図形としては点ではなく、複素平面上の動径ベクトルです。この複素数の実数部に注目すれば $\cos \theta$ が、虚数部に注目すれば $\sin \theta$ が得られます。単位円上にある複素数を解析的に表すときは、虚数単位を使った指数関数を使います。なお、角度 θ はラジアンで与えます。

$$w = \exp(i\theta) = \cos \theta + i \sin \theta \quad \dots (3.4)$$

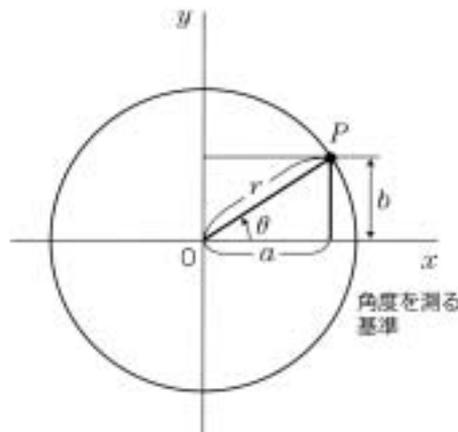


図 3.2 : 複素数は複素座標上のベクトルとして扱う

複素数の演算則

幾つかの複素数間の線型演算、つまりスカラー倍・加算・減算の組み合わせは、図形的に説明すると、原点を起点とした、幾つかのベクトルのスカラー倍・加算・減算で得られる合成ベクトルです。二つの複素数 $A \exp(i\theta_1)$ と $B \exp(i\theta_2)$ の積は、 $AB \exp(i(\theta_1 + \theta_2))$ です。解析的に説明すると、長さの積 (AB) が新しい長さ、向きは角度の和 ($\theta_1 + \theta_2$) です。図形的には、角度の和である新しい向きは作図できますが、ベクトルの大きさは代数的に計算しなければなりません。比較的便利に使われる演算は、 $\theta = \pi/4$ (90度) とした単位ベクトルとの積であって、乗じるベクトルの向きを左回りに 90度回転させます。これは、解析的に言えば、虚数単位を乗じる演算です。

フーリエ級数の複素数表現は二つのベクトルを対に使う

式(2-1)のフーリエ級数を考えるとき、代表として、 k 番目の成分を表す式を、二つの複素数の和、さらにまとめて二つの複素数の積として次のように表すことを考えます。このときは時間 t を媒介変数とした角度で与えます。

$$\begin{aligned} a_k \cos 2\pi kt / T + b_k \sin 2\pi kt / T &= \text{Real} \{ a_k \exp(2\pi ikt / T) - ib_k \exp(2\pi ikt / T) \} \\ &= \text{Real} \{ (a_k - ib_k) \exp(2\pi ikt / T) \} \end{aligned} \quad \dots (3.5)$$

この式は、複素数の実数部を取り出すと言う意味で $\text{Real} \{ \}$ と書きました。式(3.5)の右辺は、二つの式を並べて書きました。これは、この章の始めに紹介した式(3.2)と式(3.3)とに対応します。上の方の式では、二つの複素数は、長さ a_k と b_k との二つのベクトルであって、ベクトル間の角度が 90度です。変数 t を変えると、この 90度の角度関係を保ちながら、複素平面内で左回りに回転します。この回転速度は、 $k=1, 2, 3, \dots$ の順に、この比で早く回転します。下の方の式は、二つのベクトルの合成で得られる長さ a_k のベクトルが、最初、位相角 α の位置を起点として左回りをすることを表します。

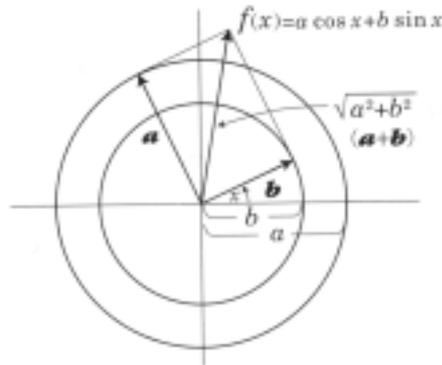


図 3.3 : 二つの複素数の和をベクトルの合成で考える
(この図は実数軸を上にした表現です)

右回りの表し方もあること

式(4)の左辺を表すとき、右回りの回転を表す複素数の式も考えることができます。式(4)の右辺で+と-の符号の付け方に注意して比較して下さい。

$$\begin{aligned} a_k \cos 2\pi kt / T + b_k \sin 2\pi kt / T &= \text{Real}\{a_k \exp(-2\pi ikt / T) + ib_k \exp(-2\pi ikt / T)\} \\ &= \text{Real}\{(a_k + ib_k) \exp(-2\pi ikt / T)\} \end{aligned} \quad \dots (3.5')$$

ここで、念のため、式(4)と式(4')の括弧の中の虚数部を取り出すと、下のようになり、絶対値が同じで符号反対の関数になります。記号の $\text{Imag}\{\}$ は、複素数から虚数部を取り出すという意味です。

$$a_k \sin 2\pi kt / T - b_k \cos 2\pi kt / T = \text{Imag}\{a_k \exp(2\pi ikt / T) - ib_k \exp(2\pi ikt / T)\} \quad \dots (3.6)$$

$$-(a_k \sin 2\pi kt / T - b_k \cos 2\pi kt / T) = \text{Imag}\{a_k \exp(-2\pi ikt / T) + ib_k \exp(-2\pi ikt / T)\} \quad \dots (3.6')$$

実数関数のフーリエ変換との対応つけ

複素フーリエ変換の図形的な意味は、複素平面上で刻々と移動している点の座標を、複数の動径ベクトルの合成で表すことです。前項の説明は、 k 番目のベクトル表す式を示したのですが、実際に利用するのは実数軸上に投影された値だけです。式の上から言うと、虚数軸上に投影される成分とを一緒に扱うことが基本です。そうすると、フーリエ解析に載せる時系列が二つ必要です。当面の解析の対象としての $f(t)$ と、もう一つ虚数軸上での時系列関数 $g(t)$ です。前項で紹介した式(3.6)または式(3.6')が後者の時系列成分です。実数関数をフーリエ解析するとき、この成分の考え方が二種類あります。一つは、虚数成分の方を無視してしまうこと、もう一つは、虚数成分 $g(t)$ が常に0となるように解くことです。後者の意味は、動径ベクトルの合成である折れ線の終点が、常に実数軸上にあるとして解析することです。この二種類は、数値計算のプログラミングでの扱いが少し異なります。

二つの時系列の比較に複素フーリエ変換を応用すること

橋梁の振動を測定するとき、通常は3方向(上下・前後・左右)の振動に注目します。このときは、振動方向別にフーリエ解析するよりも、二つの事象、例えば上下振動と橋の横振動を選んで、相互の関係が分かるように複素フーリエ変換に掛ける方法が応用できます。このときのフーリエ係数は複素数ですが、物理的には振動の強さと同時に振動の向きを知るベクトルです。二方向で周期の異なる三角関数の事象を合成するのは複素フーリエ合成です。その最も簡単な例がリサージュ図形です。

3.5 離散フーリエ変換で起こる特別な性質

DFT と FFT

フーリエ変換を代数式で表すときは、対象の関数を連続関数として扱い、媒介変数 t の取り得る範囲を $-\infty$ から $+\infty$ までを考えます。しかし、具体的な数値計算に載せる場合には、連続関数を片側有限区間 $(0, T)$ に限り、飛び飛びの(離散: discrete)座標値で扱います。このように直してフーリエ変換を扱うことを **DFT** (Discrete Fourier Transformation) と言います。この離散値化は、コンピュータ処理を前提としますが、ここでの D は、デジタル(Digital)の D ではありません。なるべく連続関数を近似させるように数値計算を計画するときは、注目する関数区間の分割幅を狭く、分割数を増やします。そうすると、計算時間が幾何級数的に増えて、結果として実用計算に向かなくなります。そこで、数値計算技術の立場から、計算の高速化アルゴリズムが研究されるようになりました。その最も革命的なアイデアは、Cooley-Tukey が 1965 年に発表したもので、**FFT** (Fast Fourier Transformation) と呼ばれます。FFT は DFT に属する計算法ですが、区間の分割数を 2 のべき乗に選ぶことが大きな特徴です。

三角関数の周期性・対称性・直交性

限られた有限の区間を周期 $2\pi k$ の正弦(sine)および余弦(cosine)の三角関数で表すとき、正弦・余弦の関数間での直交性と同時に、整数 k の値が異なる任意の二つの三角関数間でも直交性があります。この区間を m 等分した座標の三角関数の値を離散三角関数と呼ぶことにし、 $(m+1)$ 個の数値で考えます。この離散三角関数の図形は、区間の中央に対して左右対称である成分(cosine)と点対称である成分(sine)とに分けて扱います。また、 $(m+1)$ 番目から同じ事象が繰り返されると仮定しますので、この値は 1 番目と同じです。この $(m+1)$ 番目を除いた、 m 個の数値の集まりで考えると、連続関数と同じように直交性が成り立ちます。この性質を利用したのが離散フーリエ解析です。ここでの m 個の数値の集まりを擬似的な m 次元空間のベクトルと考えると、離散三角関数は、互いに直交する m 個のベクトルを与えます。連続した関数で考えれば、 k の取り得る整数範囲が 0 から ∞ までありますが、離散三角関数では $k=0$ から $k=m/2$ までです。そうすると、連続関数の時に含まれていた k が $m/2$ よりも大きい周期の三角関数は、波形を飛び飛びにサンプリングすることになり、見掛け上、低次の離散三角関数のどれかと同じになります。また、 m 等分点での三角関数の値は、符号を除けば、独立した数値が $m/4$ 個しかありませんし、これが繰り返して現れます。このような性質が DFT や FFT のプログラミングでは勘案されます。

複素フーリエ変換の場合の離散三角関数

互いに関連を持つ二つの時系列の事象 $f(t)$, $g(t)$ を、複素平面上での実数軸成分と虚数軸成分であるとしてフーリエ解析するときは、複素フーリエ変換を応用します。分割数 m の DFT を応用すると、二組合計 $2m$ 個のフーリエ係数を計算します。この場合の級数の次数 k は、0 から $(m-1)$ までを使います。このとき、 k が $m/2$ よりも大きい周期の三角関数を表す複素数は、見掛け上、式(3.5')で説明した右回りのベクトルと同じです。複素フーリエ変換を表すとき、虚数軸上の関数 $g(t)$ を常に 0 としたいときは、式(3.6)と(3.6')を加えればよいので、動径の大きさが等しい二つベクトルを考え、左回りと右回りとの和で合成することができます。実数関数 $f(t)$ のフーリエ解析をするときは、虚数軸上の事象を無視しますので、 k の次数 $m/2$ までの左回り分の係数を 2 倍にした値がフーリエ係数を与えます。

種々の細かなアイデア

FFT の特徴は、三角関数 sine, cosine の計算回数と、大量の掛け算の回数とを劇的に減らすことにあります。三角関数の計算は、関数プログラムを呼び出して処理させるのですが、この中身は複雑な計算ステップを取ります。しかし、同じ角度の計算を何回も利用しますので、定数表の形で関数値を作成して参照する、などのテクニックを使い、演算時間の節約を図ります。また、実数の演算は、整数の演算に較べて何倍もステップ数を必要としますので、コンピュータの計算能力を表す指標として **FLOPS** (Floating Point Operation per Second) を問題とすることがあります。低い能力のコンピュータは、それなりに実用計算の制約になります。数値計算を高速化するには、理論上の算法(アルゴリズム)に加えて、論文に載らないような細かな技法(ノウハウ)を組み込みます。数値計算が技術として研究されるのは、これらの理由があるからです。例えば、数値を二倍する計算は、掛け算に代えて同じ数の足し算にします。2進数表現のデータは、ビット並びのシフトで処理されます。2乗の計算は、べき乗の計算ではなく、同じ数の掛け算に代えるなどが比較的単純な手法です。これらは、プログラミング言語のコンパイラに最適化の機能があると、内部的に解決してくれます。

分かり易いプログラミング

コンピュータのソースプログラムは、処理の流れがよく分かるように作文（コーディング）します。これは、プログラムの実行状態を追いかけるとき（トレース）、エラーの原因を発見するとき（デバッグ）に効果があって、プログラムの保守管理上大切な考え方です。これを透明化と呼ぶことにしました。この反義語が、スパゲッティコードです。プログラム単位を幾つかのモジュールに分け、独立したサブルーチンの集合にしておくとう透明度が上がります。コンパイルされた実行形式のプログラムは、中身を追いかけることができなくなりますので、そのような対象をブラックボックスと言います。工学的な解析を必要とするときに、DFT や FFT を応用するプログラミングは多いのですが、そこで採用されているプログラムは、プログラミング言語の種類もコーディングの習慣も多種多様です。この報文で紹介するコードは、種々の参考書に載っているプログラミング言語のソースコードから Visual Basic 6.0 に翻案したものです。

4. 構造物回帰モデルの同定と判定

4.1 線形モデル

線形の式でモデル化すること

離散値化した時系列のデータ $f(t)$ に何かの周期性があるとき、統計的には元の事象に回帰的な性質があると言います。それを表す数学的なモデルを自己回帰モデル (autoregressive model: AR モデル) と言います。下に示すように、時系列の離散化データ $f_1, f_2, f_3, \dots, f_{n-2}, f_{n-1}, f_n, \dots$ の並びにおいて、過去のデータが或る比率 a で現在に影響する線形式を考えます。線形は一次と同義であって、二次式以上の形 (f^2, f^3, \dots) を含まないことを意味します。

$$f_n = a_1 f_{n-1} + a_2 f_{n-2} + \dots + a_m f_{n-m} \quad (4.1)$$

ここで、 m を回帰モデルの次数と言います。ここにも次数と言う用語がでてきますので、誤解を避けるために線形用語と使い分けします。一般的な議論はありますが、実践的には (式 1) の右辺で第 2 項まで、つまり 2 次までのモデルが応用されます。2 次の場合には、初期値として f_1 と f_2 とが与えられれば、それ以降の事象がすべて決まります。逆に、連続した 4 個のデータから、係数 a_1, a_2 を求めることができます。この節で説明したいことは次のような数学的かつ工学的な解釈の過程です。

- (式 1) は、 $f_n : (n=1, 2, 3, \dots)$ を変数成分とする連立方程式になること
- したがって、 a_1, a_2, \dots を係数とした無限次数の行列で表す方法もあること
- 実用としては、二次の回帰モデルがよく合うこと
- そうすると、(式 1) の形は、2 次の差分方程式の形に書き換えることができること
- そして、この時間差を小さくした形は 2 次の微分方程式であること
- 構造物の振動事象の回帰モデルは、力学的にはその構造物の振動系モデルであること
- この振動系モデルは、2 次の微分方程式になること
- これを解いた、自由振動の式は一般に減衰振動であること
- 橋梁の振動系のモデルでは、単純梁を仮定するのが実践的であること
- 橋梁の振動測定データを解析した自己相関関数は単位インパルスに因る応答と相似になること
- この応答を (式 1) に代入すれば係数 a_1, a_2 が求まること
- したがって、係数 a_1, a_2 から、橋梁の固有振動数と減衰係数が計算できること
- この結果を、対象とした橋梁の耐荷力の判定に応用すること

橋梁の振動モデルは 1 自由度系と仮定する

橋梁の力学構造として最も標準的な力学モデルは単純梁です。長さ L 、単位長さの重量 w 、曲げ剛性を EJ と置きます。支間の中央に単位荷重 $P=1$ が作用するときの撓みは $L^3/48EJ$ です。これをバネ定数 K の逆数とします。単純梁の自由振動は、梁の全質量の半分を支間の中央に集中質量 (lumped mass) M として集めた 1 質点 1 自由度の振動系と考えると実際現象と良く合います。自由振動を表す二階の微分方程式は、下のようになります。ここでの C は速度に比例する減衰力の成分です。この大きさは、理論的ではなく、実橋梁の振動測定で求めなければなりません。

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} + C \frac{dy}{dt} + Ky = 0 \quad (4.2)$$

この式を下のような振動の標準形式に書き直します。

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2h\omega_0 \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y = 0 \quad (4.3)$$

ただし

$$\begin{cases} 2h\omega_0 = C/M \\ \omega_0^2 = K/M \end{cases}$$

減衰があると振動数は下がること

式(4.3)の微分方程式の一般解は、下の式(4.4)に示すような減衰振動です。初期値として A と β とを仮定しますが、通常は $t=0$ で変位が0、初速を1として解きます。これを単位衝撃（インパルス）による振動系の変位応答と言います。強制振動は、大きさの異なるインパルスが次から次へと振動系に作用して重畳する現象です。

$$y = Ae^{-\lambda t} \sin(\omega t + \beta) \quad (4.4)$$

ただし

$$\begin{cases} \omega = \omega_0 \sqrt{1 - h^2} \\ \lambda = \omega_0 h \end{cases}$$

この式(4.4)を模式的にグラフに描いたものが図 4.1 です。構造物の振動データから自己相関関数を計算してグラフに描くと、減衰振動のグラフが得られますので、図 4.1 と比較して、減衰の性質と似たグラフ形状から h の大体の大きさが分かります。減衰の影響は、系の持つ固有振動数を低くしますが、実際構造では無視できます。つまり、自己相関関数のグラフは、固有振動数と減衰係数の大体の様子を知る目的に使います。

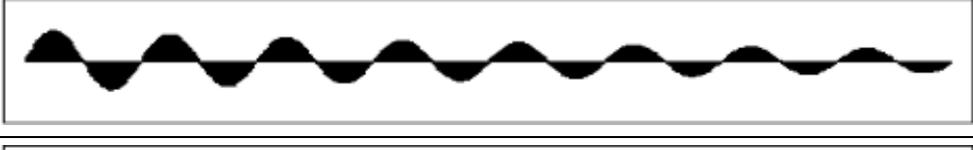
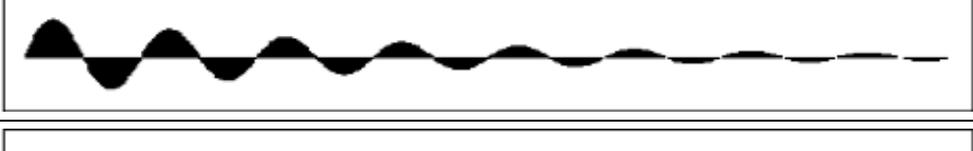
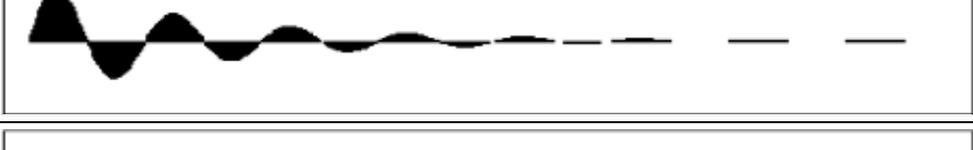
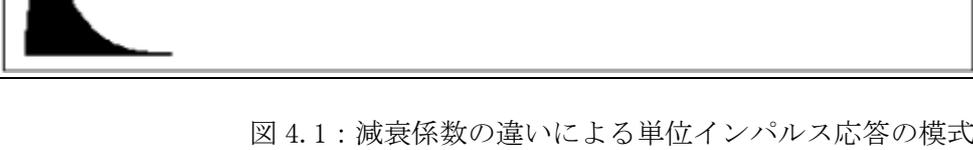
	$h = 0.01$ $y(i+1)/y(i)=0.94$
	$h = 0.02$ $y(i+1)/y(i)=0.88$
	$h = 0.05$ $y(i+1)/y(i)=0.73$
	$h = 0.1$ $y(i+1)/y(i)=0.53$
	$h = 0.2$ $y(i+1)/y(i)=0.27$
	$h = 0.5$ $y(i+1)/y(i)=0.03$
	$h = 1.0$ $y(i+1)/y(i)=0$ critical damping

図 4.1 : 減衰係数の違いによる単位インパルス応答の模式図

連続した3時点での離散化データから式を求める

式(4)は、媒介変数である時間 t の連続関数の式ですので、これから、ある微小時間間隔 Δt でサンプリングして、連続した三つの変位 y_{n-2} 、 y_{n-1} 、 y_n を求め、それから A と β を消去した関係式を下のように導くことができます。

$$y_n = 2y_{n-1}e^{-\lambda\Delta t} \cos \omega\Delta t - y_{n-2}e^{-2\lambda\Delta t} \quad (4.6)$$

式(6)の y の形は、式(1)の f の順番と合わせてあります。したがって、式(1)の二つの係数 a_1 、 a_2 は、 ω と λ 、及びサンプリング時間間隔 Δt を使って表すことができます。

$$\begin{cases} a_1 = 2e^{-\lambda\Delta t} \cos(\omega\Delta t) \\ a_2 = -e^{-2\lambda\Delta t} \end{cases} \quad (4.7)$$

式(7)から λ と ω が計算できます。

$$\begin{cases} \lambda = -\frac{\ln(-a_2)}{2\Delta t} \\ \omega = \frac{1}{\Delta t} \cos^{-1}\left(\frac{a_1}{2\sqrt{-a_2}}\right) \end{cases} \quad (4.8)$$

時系列データから係数が計算できること

式(1)のところで説明しましたが、二つの係数 a_1 、 a_2 は、連続した4点のデータを3点ずつの組みで考えた連立方程式を解くことで得られます。 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 を、この順での時系列データとしますと、下の式が得られます。

$$\begin{cases} a_1 = \frac{f_2f_3 - f_1f_4}{f_2^2 - f_1f_3} \\ a_2 = \frac{f_2f_4 - f_3^2}{f_2^2 - f_1f_3} \end{cases} \quad (4.9)$$

構造物の振動データから自己相関関数を計算することによる利点は、白色雑音成分を除き、周期成分を強調できることであって、その波形は単位インパルスと相似になります。式(9)の f に代えて相関関数 $C(\tau)$ を代入して、式(8)とから λ と ω を解析的に求めます。 h と ω_0 は、式(5)の関係から計算することができます。これらの式が、解析的に固有振動数と減衰率を求める方法であって、そのデータに自己相関関数を使います。測定データから自己相関関数を計算すると、先の図4.1のような綺麗な減衰のグラフは得られませんので、式(4.9)を応用して係数を求めるときには多少の調整が必要です。その方法は、自己相関のグラフを元波形として再度自己相関グラフの計算をして雑音成分を減らすことです。また、高調波の振動の影響は時間軸の早い区間に出現し、また早く減衰もしますので、時間軸で、やや右に寄った部分のデータ値を使います。

4.2 実構造物の振動の判断方法

静的な撓みと固有振動周期とは関係があること

構造物は、電気機械装置とは異なって、振動しない状態が基本です。したがって、住居空間としての建築構造物が、しょっちゅう揺れるのは異常です。超高層ビルは、地震のときに周期の長い振動を体感しますが、実は、普段でも微小の揺れがあります。振幅が小さいのと、周期が長いので実感しませんが、非常に敏感な人は気分が悪いと訴えることがあります。橋梁構造物は、見かけは丈夫でも、良く揺れますが、これは橋梁の機能として必然的な性質です。橋梁は荷重を受けると撓みます。この大きさが振動と関係します。実用的には大きな撓みが出ないように、撓みの大きさを制限します。これは、自重と、移動荷重とを勘案します。通常の道路橋では自重の影響が大きく、鉄道橋は活荷重の影響が大きく出ます。何れにしても、橋梁の振動は、荷重による静的な撓みの位置を中心として振動します。したがって、この静的な撓みの大きさが、固有振動周期と関係します。この性質は、「易しくない橋梁工学」の 6.5 節で紹介してあります。結論から言うと、静的な撓み δ と、振動周期 T 、またはその逆数としての振動数を N とすると、どのような力学系であっても、近似的に下の式が得られます。

$$\delta = \frac{T^2}{4} = \frac{1}{4N^2} \quad (4.10)$$

橋梁の振動周期は支間の自乗に比例すること

上に挙げた式(4.10)は、構造物に限らず、すべての振動現象に応用できます。例えば、周期 1 秒の振動は自重による静的撓みが約 25cm、2 秒で 1m、0.1 秒 (10Hz) で 2.5mm の性質になります。橋梁の設計では、静的撓みの制限を支間の 1/500 ないし 1/1000 程度に規定していますので、結果として振動周期の自乗が支間に比例します。この性質は多くの橋梁の振動測定を統計的に整理すると明確に得られます (図 4.2 参照)。

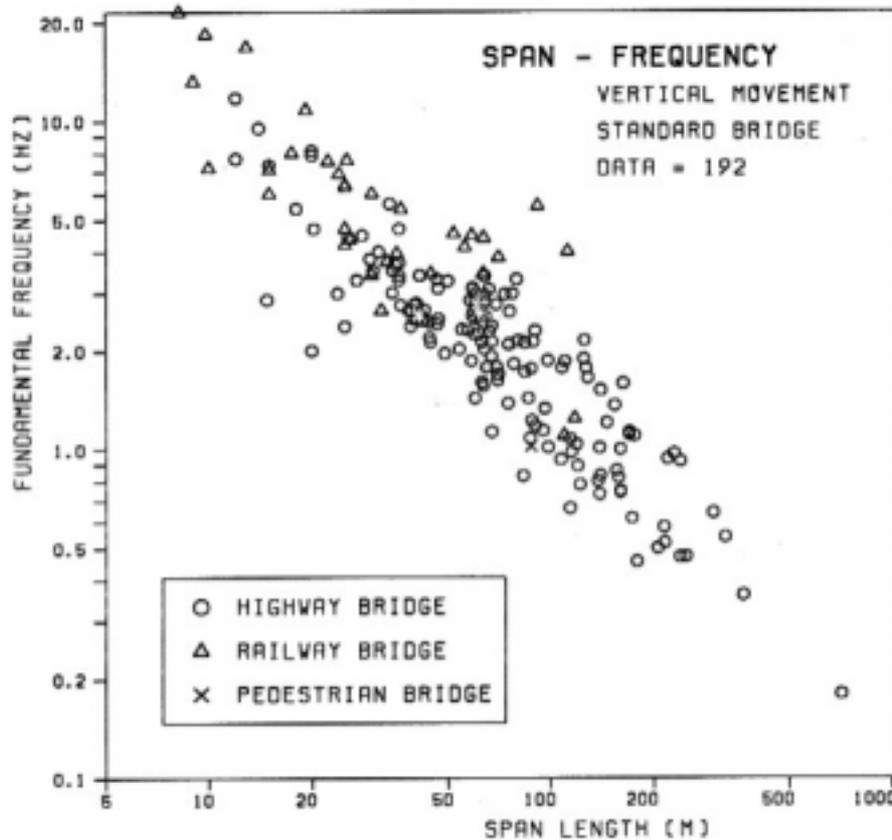


図 4.2 : 橋梁の固有振動数と支間との関係 (加藤による)

橋梁の剛性を相対的に判断する

橋梁の支間と固有振動数との関係に対数グラフでプロットした図 4.2 を見ると、明瞭な斜めの回帰直線の性質が認められます。したがって、振動測定の結果をこのグラフ上に重ねたとき、斜めの回帰直線よりも上側にあれば、その橋梁は平均的に剛性が高いと言えます。今、同じ橋梁を何年かの供用期間を経て測定できたとしたとき、固有振動数が下がることが認められれば、その橋梁の剛性が下がったことを意味します。実は、筆者は東名高速道路が完成した直後に架設された橋を、それから 10 年を経た後で再度振動を測定する機会を得て比較することができました。この結果は非常に有意義でしたが、ここでは説明を省きます。

水平方向の剛性の判定に利用できる

橋梁の振動は、上下の撓み振動だけでなく、水平方向の振動にも特徴のある性質が現れます。この中、橋軸直角方向の振動は、橋の横方向の剛性と関係を持ちます。特にアーチ橋は幅員に較べて橋全体の構成高さが高くなりますので、いわゆる横倒れ挫屈に対する安全照査が必要です。振動数が低く測定されたとき、設計上、対傾構の剛性が低いと判定することができます。では、どの程度であれば良いかの判断基準が必要です。水平方向の外力としては、風圧によるものと、地震時の水平震度によるものがあります。これらの力は、仮に自重を水平に加える場合に較べて低いのですが、自重が作用したとして計算した水平変位の大きさが、先に説明したように振動の周波数と関係があることを勘案します。建築構造物の水平動の固有周期（秒）には統計的な性質が知られています。鉄筋コンクリート造では高さ(m)×0.02、鉄骨鋼造は×0.03 程度です。低層の瓦屋根を持つ日本住宅では頭が重いので、比較的low周波の振動が出ます。仮に固有周期 1 秒の構造があつて、水平震度が 0.2 の水平地震動であれば片振幅で 5 cm の振幅になります。もし、その振幅で建物の水平変形に余裕が無ければ、倒壊する危険があると判断できます。

4.3 複数の固有周期がある場合

多質点系としての振動

振動力学の基本は、質点一個に一つのバネと一つのダッシュポットを付けた力学系を考え、式(2)のような微分方程式でモデル化します。しかし、これは振動の方向を一方向に制限し、回転運動を考えません。もし一般的に一塊のマス集合で立体的な動力学の性質を求めたいのであれば、回転を考えて全部で 6 成分の運動を解析しなければなりません。橋梁の振動を立体的に解析するのであれば、三方向の振動に加えて、少なくとも振れの成分が必要です。単純橋で振れの影響も考慮したいときは、2 主桁構造を仮定し、マスを二個考えます。この構造物の振動の自由度は、単純計算では 12 あるのですが、二つのマスの間隔と向きを固定して考え、橋軸方向の水平動と平面内の回転運動などを無視すると、振動の自由度は三成分に下がります。つまり、上下動・橋軸方向水平動・橋軸回りの振れです。橋梁の場合には支間方向に多質点でモデル化し、これが幾つかの上下動の振動モードを発生します。

スペクトル解析をすると山の重なりになること

構造物は線形の弾性モデルと仮定できますので、個々の固有振動は運動エネルギー的に独立の性質があります。したがって、振動をスペクトル解析すると、個々の振動スペクトルを単純に加算する形で得られます。ただし、このスペクトルは、星の光をスペクトル解析するときに得られるような明瞭な線スペクトルではなく、確率的な山を示します。これは、外的な攪乱力に引きずられて振動応答をするからです。したがって、スペクトル図は、山を重ね合わせたように得られるのが普通です。つまり、物理的または数学的に正確なピークを持った周期性は得られません。式(4.2)の振動系の基本式を解くとき、粘性項が大きくなると、スペクトルの形状がなだらかな山になるか、山にもならないことがあります。このような性質は地盤の性質に現れます。地盤の卓越振動の測定は難しいところがありますが、構造物から伝わる、やや鋭いピークのスペクトルを除いた全体のスペクトル図形が、この傾向を示します。測定結果を解析するとき、単純にスペクトル図の座標軸を比例尺度に取るのではなく、両対数軸でプロットする方が、全体のスペクトル図を判断するときに役に立ちます。その意味で、一質点系の応答を両対数軸でプロットしたものを図 4.3 に示します。このグラフは単純なフーリエ応答を表していますので、パワースペクトル応答に換算するときは縦軸の尺度を二倍に先鋭化して比較に使います。

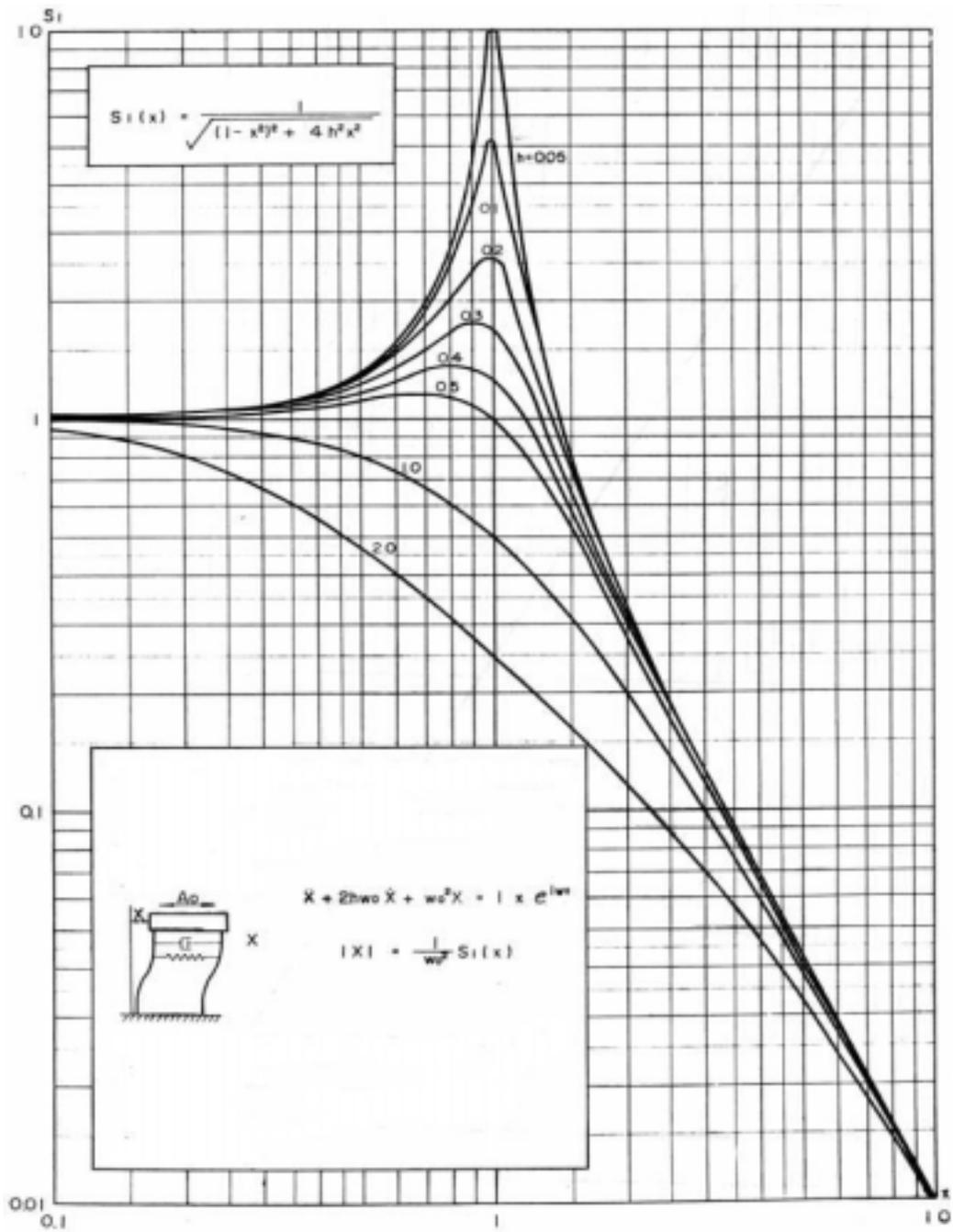


図 4.3 : 一質点系の振動応答のグラフ

5. 測定の実施と結果の解釈

5.1 科学的解釈法と工学的解釈法

抽象化から具象化への筋書きに工学的解釈が必要

構造物の振動現象を発現する抽象化モデルは、単純に考えるときは、質点とバネとで構成される倒立振子を考えます。これは、構造物の実体とは全く別の形状をしていますので、もう少し実形状に近いモデルを仮定します。そうして、そのモデルの振動を測定するような実構造の箇所に振動計を置きます。橋梁の場合には、重さのない構造骨組に、幾つかの集合質点(lumped mass)を付けた動力学的なモデルを考えます。いずれにしても、それは測定結果とのつじつまを合わせる仮説ですので、納得の行く場合と、そうでない場合があります。この議論をすることが**工学的解釈**です。そこには当然ながら私見も入ります。この章は、著者の私見が多く含まれます。したがって、複数の人が別々の解釈をすることも許されます。なにかの結論を出さなければならないときでも、複数の解釈を並べます。それは現象の見方を広くしますが、少しずるく見えます。一方で、真理の追究をすることを科学的な態度とすると、**「一つの真理が必ず在る筈だ」とする硬直的な思い込み**もあります。そうすると、異なった解釈があるのは我慢ができなくなり、感情的な対立になることもあります。**「分からない」と言うのも一つの正直な解釈**です。行政的な意思決定を必要とする具象化のときは、多数意見を結論とする一見民主的と見える意思の統一が必要になりますので、多数派工作に巻き込まれことも起こります。自派に都合のよい学識経験者の権威を利用するのがそうです。工学的解釈は、もっとおおらかに利用したいものです。

力学モデルは一種類に限らない事

一般的に言えば、振動現象は、観察場所の変位が時間的に変動することです。そこには、いつも理想的な一つの力学モデルが仮定できるとは限りません。橋梁構造物の場合、最も抽象化した振動系のモデルは、**一集中質点**(lumped mass)を持つダッシュポットとバネで構成した**一自由度**のモデルです。単純橋の振動モデルは、重さのない梁の中央に、橋の全質量の半分を持った集中質点を持つと仮定したモデルが、上下振動の測定値を良く説明できます。しかし、橋梁は立体的な構造物ですので、上下振動だけでなく、横揺れや捩れ振動も起こします。少し複雑に考えるならば、一つの**慣性を持つ質点**を仮定し、3方向の動きと3方向の回転、計6成分の運動を考えます。橋梁は比較的対称性がありますので、3方向の変位成分ごとに独立した一質点一自由度の振動系を仮定できます。しかし捩れに関しては、最小限2つの集中質点を左右に持つようなモデルが便利です。2集中質点系は合計6つの振動自由度を持ちます。そこで、単純橋では左右の桁に質点を持たせた系を仮定します。そして**「主桁間隔が一定である・橋軸方向の変位は殆ど考える必要が無い・そして橋の水平面内での回転も無い」と仮定**できます。結果として、**「上下動・橋軸直角方向の水平動・橋軸回りの捩れ」**の3成分が残ります。振動の実測値を解析値と比較したいとなると、橋梁の立体的な構造解析が必要になるのですが、捩れ剛性を持つモデルをどのように仮定して計算すれば合理的であるかの吟味は未解決です。振動測定は、その手掛りを与えてくれるはずですが。

振動現象には二つの要因がからむこと

振動が観察される場合。その原因として、対象としている本体に**振動する性質**がある場合と、外からの**攪乱力**から振動を受ける場合の二つが混ざります。構造物本体に振動する性質が無くても、外からの攪乱力があれば振動が観察されます。そこで、工学的に振動現象を解釈するときは、まず、その二つの要因を分離することを考え、次に、それらがどのように関わるかを解析します。例えば、構造物の振動解析は、主として前者に焦点があり、地震動の解析は後者に注目します。その両方がどのように関わるかを**応答**として研究します。それらを踏まえて実践的に応用することが、設計方法・構造物の健康診断に基づく補修法・耐震設計法、などの提案です。研究の段階までは、問題を単純化・モデル化しますので、個別の性質を抽象化します。つまり学者の常套手段である一般論や総論の類です。しかし、提案の段階では、対象とした構造物ごとに判断や処方異なる具象化が必要です。この場合に行政的または政治的な判断が入るのは当然ですが、それを裏付ける工学的な解釈が専門技術者に要求されます。学者の論説を設計理論に生で使うと、難しい式が並んで実用の面で迷惑なことも少なくありません。設計に応用する、などの具象化には、理論的・公式的な手法を参考にはしても、経験的知識の蓄積と、その応用が物を言います。

なにを求めるかをシステム構成で決めること

現実の振動現象は、上で説明した二つ、振動する本体の性質と攪乱力の性質とが混ぜこぜで観察されますので、それを分離して取り出す測定方法を工夫します。これを、測定装置側と解析側とに便宜的に分ける考え方の用語が、ハードウェアとソフトウェアであって、その全体をシステムとして構成します。ソフトウェアは、作業手順や段取りなどからむヒューマンインタフェース (human interface) も含みます。少し官僚的になりますが、測定実施要領や、測定マニュアルなどにまとめます。橋梁本体の振動特性の測定は、振動を起こさせる攪乱力の影響を除くようにシステムを構成するのが普通です。しかし、攪乱力は、主に通過する交通車両が起こしますが、これは橋梁に対して疲労の要因ですので、その方を独立に取り出すシステムも必要です。この両者は、ハードウェア側を個別に開発するのではなく、ソフトウェア側で弾力的に対応するようにします。パソコンやその周辺機器の性能が進歩してきましたので、フィルタ回路など、従来はハードウェア側に組み込む機能を、ソフトウェア側で解決させる方が便利になりました。したがって、全体をシステムにまとめる工学的な考え方を必要とします。標準化したデータ解析方法を提案しておく、多くの人の測定結果を統計的に整理することができますので、それとの比較で客観的にデータを判定することができます。その結果から、何が分かるかを論じるのが解釈です。これには、幾つかの実測例を参考にする勉強が必要です。

5.2 現場振動測定システムの一つの提案

三成分振動計測器が基本であること

当然のことですが、振動を計測するハードウェアには受振器（センサー）と記録器のセットが必要です。橋梁の振動では上下動に焦点があり、建築構造では水平動が重要です。提案の結論から言うと、垂直および水平2方向の加速度計をセットとした三成分の計測記録ができる、小型で可搬性のある測定装置が最小構成として便利です。電子技術が進歩してきましたので、精度にこだわる地震計並の重量感のある装置よりは、取り扱いが便利である方が一般向きです。振動記録は、従来は大きなレコーダを必要としましたが、アナログ記録をデジタル変換して大容量の小型メモリに記録できるようになりました。この辺の技術開発は日進月歩の趣があって、知ったかぶりの常識にこだわっていると恥を掻きます。ソフトウェアを組み込んだパソコンもモバイル型は電池で駆動できますので、条件が良ければ現場で測定から解析まで済ませることができます。しかし、現場での作業性を考えるならば、欲張ったシステムよりは、測定作業だけに専念するべきであって、パソコンによる解析は室内作業で計画する方が勝ります。研究目的で計測をするときには、あらゆる可能性を考えるシステムも必要でしょうが、構造物の健康診断を目的とする場合には、数ある構造物の測定を流れ作業的にこなす必要がありますので、測定器側の仕様を絞り込みます。

測定対象が構造物である場合の仕様

振動計測装置は、対象物とその振動数の範囲によって仕様の範囲が決まります。構造物の場合には、周波数0（静的変位）から、大体100Hz程度までが対象です。材料内部を走る縦波を問題としたいこともあります（次節で解説します）、そこは別に対策を考えます。機械振動、例えば自動車エンジンでは100Hzは毎分6千回転(6000rpm)ですので、もっと高い所までの周波数を考えます。低い振動数を測定するには変位計が最善ですが、小型で簡単なセンサーは製作できません。レーザを応用する変位計を試したこともあります、構造物の測定に応用すると、基準とする不動点までも振動の影響を受けますので、実用になりませんでした。速度型のセンサーは、内部に磁石を必要とする分、重量が高みます。抵抗線歪み計の原理を使う加速度センサーは、周波数0から感度があります。圧電式のセンサーは低い周波数の感度が極端に下がります。加速度型のセンサーは高い振動数に対して感度が高くなりますので、雑音成分が強調される欠点があります。振動の解析では、これを抑えることに多くの苦勞があります。しかし、電子技術が進歩してきましたので、センサーのデータにあまり事前加工をしないでデジタル化し、ソフトウェアで解決する方が弾力的に対応できるようになりました。例えば、加速度データから数値積分で速度データ、さらには変位データに変換することが簡単ですので、速度型、変位型のセンサーにこだわる必要がなくなっています。

センサーの設置場所

構造物の振動計測では、センサーを、どこに、どの向きに注意して置くかは、計測結果の判定のときに重要な参考事項です。橋梁を例とすると、橋の支間中央の道路床面であればどこにあっても主構造の卓越振動が得られると思いがちです。しかし、床自体も局部的に独立な振動をしますので、質のよいデータが得られないことがあります。橋は垂直方向の荷重に抵抗することが主目的ですので、垂直面内の変形に注目するのは当然です。しかし、橋自体は立体的な構造物ですので、橋軸に直角な水平方向の変位と、橋軸回りの捩れ回転もあります。床版は水平方向にはかなり大きな曲げ剛性がありますので、床面に置いたセンサーは水平面内の変位は小さくしか得られません。また捩れの成分は垂直方向の変位と重なります。したがって、捩れ成分を分離したい場合には、幅員の左右で同期を取って垂直変位を求めます。アーチ橋・トラス橋などは、高さの高い上弦材の位置での水平変位から捩れ成分を引き出します。1箇所では変位の3成分を同時測定するセンサーを使うときは、離れた2箇所での同期測定ができませんので、測定箇所を移動させて、個別の測定データから総合的に判断しなければなりません。

橋脚・橋台・地盤の振動も重要

橋梁の振動は、橋梁本体の振動に注目するのは当然ですが、橋を支える下部構造の動的な性質を知ることが重要です。下部構造の振動は、橋梁上を通行する車両が起振力を受けるのですが、上部構造の振動も受けると同時に、別個の性質も現われます。建築構造物の場合には、そこに居住する人が振動源になることはなく、地盤から伝えられる地震動などに応答しますので、建築構造物自体の振動性状を実験的に求めることに困難を伴います。地盤振動を知るには、辛抱強く地震を待たなければなりません。超高層ビルでは、風の強い日に振動を計測できることがあります。しかし、地盤は種々の原因から常時微動がありますので、それを増幅して測定する方法があります。乱暴に見えますが、ダンプカーなどの重量車を周辺で走らせると、局部的な範囲の地盤性状の測定ができます。その応答で中小規模の建築構造物の振動応答を計測することができます。地盤の振動については、正直に言って、分からないことが多くあります。その振動範囲は、人の感覚の外にある周波数範囲にまで伸びていますので、構造物の振動を対象としたセンサーとは別のシステムも必要です。地震を動物が予知するのは、人の感覚を外れた周波数領域の振動を感じるからだと思います。これらの振動は、従来のオーディオ用カセットテープレコーダで振動データを記録することができます。最近ではテープを使わず、小型のデジタルメモリに直接録音する製品があります。加速度計の出力も音として録音できます。

ヒューマンインタフェース

構造物の振動測定作業は、その現地に出かけなければなりません。業務としてでなく、知的興味の対象としてデータを得たい場合もあります。構造物の数は何十万もありますので、一回の測定単位の時間と手間とをなるべく単純に計画して、できれば標準化します。データをスペクトル解析に載せるときは、一回のデータのサンプリング時間に1分もあれば十分です。一つの理想は、ショルダーバッグに測定装置一式と解析用のノートパソコンを納めて、写真撮影の独り旅のような感覚でデータを集める方法です。橋梁の場合には足場の悪い場所にセンサーを設置しなければならないことがありますし、加振は重量の分かったダンプカーを使うと質のよいデータが得られますので、安全対策の面からチームワークが望ましいでしょう。このような作業は、大学での研究に向いていて、大学生の戦力が利用できます。従来の大学では産学共同的な研究が罪悪視されていましたし、担当者側では工事箇所に立ち入ることは労働安全衛生法を盾に制限しました。この点については、今後、良い方向に向かうことが期待できます。



図 5.1 ポータブルな三成分加速度記録計



図 5.2 荷重車走行で起振させて測定する

モニタリング

フィルムを使う写真撮影は、現像して焼き付けをして、始めて撮影結果が分かります。現在のデジタルカメラは、その場で直ぐに撮影結果が分かります。振動測定の場合においても、期待通りにデータが得られているかどうかの確認が直ぐにできると、無駄な作業を減らすことができます。これをモニタリングと呼ぶことにします。伝統的な方法は、オシログラフで実時間に観察することですが、データをデジタル記録すると、再生が簡単にできます。この場合には、ある時間間隔での静的なグラフで見る方式が良いでしょう。データ解析のソフトウェアについては、次の章で解説します。ノートパソコンを現場測定にも持って行ける時代になりましたが、測定環境は必ずしも良好とは限りませんので、室内作業で行うような欲張った解析作業を現場まで持ち込むべきではありません。

5.3 振動と波動の解釈

振動と波動とは見方の違いにあること

振動は、観察本体の運動と同時に、何らかの媒体を伝わる現象としても観察されます。機械振動は本体の振動に注目することが多いのですが、構造物は連続体ですので、構造物を伝わる振動、つまり波動があります。部材が独立に振動する現象もありますが、一点での観測で済ますのではなく、見方を広く取って、時間的・場所的に移動する波動現象としても捉える必要があります。典型的な波動と言えば、地震、音波、海の波などです。光や電波も波動ですが、これは特殊です。「光が波動であるならば、それを伝える媒体（エーテル）があるはずだ」と言うのが大論争になったのは、この常識に基づいたからです。波動は、媒体の中を通る速度が重要なパラメータです。実は、構造物の振動の場合にも、その中を駆け巡る波動を観察しているのですが、波形の移動として捉えることをしません。しかし振動の変形モードは波形の移動が同期している現象ですので、その実像を捉えるには、複数箇所での同時測定をするのが最善です。しかし、地震動の観測のような複数の定点観測が可能である場合は別として、現実には構造物の振動測定を計画するとすると、複数箇所の同期を取って振動を測定することは経費の面で問題があります。そこで、何箇所か移動しながら、点としての振動測定を総合して、全体像を見出す方法に工夫が必要になります。この場合、一箇所の振動測定値から、「理論計算で振動モードと振動周期とを推定した値」に広げて無理に合わせるのは、必ずしも正しい結論を導くことにはなりません。

波動には縦波と横波があること

音波は縦波または粗密波、海洋の波は横波であるのは常識です。地震波には縦波と横波とがあってP波・S波と区別されていて、速度も違います。構造物の振動も、縦波と横波とが測定されます。構造力学の観点からは変形を伴う横波の方を注目するのですが、部材内部を伝わる縦波、つまり音の成分を拾うことが少なくありません。振動計は、縦波と横波とを区別しないで、単に振動方向の成分を記録します。加速度計を使って振動測定をすると、高い周波数領域の雑音的な音波が強調されますので、低い方の振動が埋もれてしまう傾向があります。相対的に低い成分の振動を取り出すには、加速度計よりも、速度計、さらには変位計の方が望ましいのですが、実用的なシステムにするにはいくつかの利点欠点の課題があります。そこで、計測器側（ハードウェア）、もしくは解析段階（ソフトウェア）でフィルタなどを使って雑音を除く、などの工夫もされます。加えて、振動の現場観測位置や、その設置方法にも経験的な注意が必要です。橋梁では、主構造としての全体振動と共に、トラスなどでは弦材単独、床組なども独立に振動をしますので、現場での測定の実態を知らないで、振動結果だけを判定すると誤った結論を導くことも起こります。縦波と横波を区別する一つの方法は、一点での測定であっても、三方向の振動を同時に記録することです。振動の向きによってスペクトル分布に差が出ますので、それが現象を解釈するとき役に立ちます。

周期の長い横波の例は吊橋などに現われる

吊橋の架設段階でのケーブル・斜張橋の吊りケーブル・送電線など、ケーブル状の構造では、一端で何かの衝撃振動を与えると、それが横波となって移動して他端に伝わり、反射して戻ってくるのが観察されます。この往復の時間が、このケーブル構造物の1次振動の固有周期です。全体として、この周期で正弦波形の振動をすることは滅多にありません。もしそれが観察されるのであれば、非常に危険な事態のときです。斜張橋ケーブルの風琴振動や、送電線のギャロッピング振動（跳躍振動）がその例です。バイオリンなどの弦楽器は支点間が短いので、横波が支点間を往復しているとは思わないのです。橋梁の撓み振動も横波ですので、振動波形が支点間を往復します。したがって横波の波動としての速度があります。例えば、支間50mの橋では1次の固有振動数が約2～3Hzですので、橋長を往復する横波としてみると、秒速にして200～300mになります。これは音速よりは少し遅れます。この速度は、橋の曲げ剛性と単位重量とに関係します。荷重車が橋梁の一端に進入したとき、他端で振動を観測すると、この速度分の時間差を伴います。ただし、実橋梁では、この時間差を殆ど意識する必要はありません。

地盤の長い固有振動周期の解釈

関東平野・濃尾平野などの広い平野部には、周期の長い（数秒以上の）固有周期があるとされ、超高層ビルではそれと共振することも観測されました。地盤の固有周期と、超高層ビルのそれとは、力学的なモデルは同じではありません。地盤は、弾性的な性質もありますので、それが結果として地盤を伝わる縦波または横波として観測されます。その速度は音波より速いのが普通です。この伝播は、地表の下の地質構造に関係しますので、場所によって現われ方に差があります。大きな構造物は比較的深い場所まで基礎を下げますので、地下深くを伝わる縦波の影響を受けます。杭打ちや発破作業を、離れた箇所でも振動を観測すると、音よりも地盤を伝わる振動の方を先に受信します。この波動現象が、ある区間で反射して同期を持つと、見かけ上、それが長い固有周期として得られます。現象としては、パルス状の衝撃波が重なったランダム波が観察され、きれいな正弦波形が得られることはありません。このような長周期の振動のモデルとして、広い平野の軟弱地盤モデルを、洗面器に水を入れ、それが揺れるのと同じとする説もあります。しかし、このモデルは物理的な境界条件の仮定に無理があります。重い釣鐘でも指一本で周期的に力を加えていると次第に振幅が大きくなるのと同じ理屈で、超高層ビルも周期的な地盤振動のパルスに同期すれば大きな揺れを起こします。地盤全体がゆったりと横揺れをするのではありません。もしそうであるなら、その運動エネルギー全体は、とてつもなく巨大になるからです。

コンクリート建造物は縦波を良く伝える

コンクリートの建造物は、柱や梁のような、長さを持つ構造力学部材として設計もされますが、コンクリートダムのように、連続体、つまり、マスとしての特徴も持ちます。そして、その連続性は、強固な岩盤との接続を例外とすれば、多くの場合、周辺の地盤とは力学的には縁が切れています。したがって、コンクリート建造物で振動を観測すると、その内部を駆け巡る音（縦波）を良く拾います。コンクリート造の建築物では、どこからともなく衝撃音が伝わってくるのを経験するのがそうです。これはコンクリートに弾性的な性質があるからです。そのヤング率を測定する一つの手段として、超音波を使う共鳴振動を使う方法があります。高さが小さい試験体を使うので、リバウンドの同期周波数が超音波の領域になります。長さが長い部材ですと可聴周波数領域で振動測定に掛かるようになります。コンクリートの建造物は複雑な形状をしていますので、音の反射は複雑に絡み合い、きれいに同期した振動数を解析的に分離できることはあまりありません。しかし、条件がよいと、エコーのような音の繰り返しを耳で聴くことができます。コンクリートは、打ち込み後、強度がゆっくりと上がり、結果としてヤング率も上がります。そのため、ある年月を経て同じ観測をすると、エコーの振動周波数が上がっているのを確かめることができます。筆者は、三重県青蓮寺にあるコンクリートダムと、東名高速道路の川音川橋梁の高橋脚で経験することができました。どちらも或る年月を経て二度振動測定をする機会があって、後で測定したエコーの周波数が高く得られました。これは、その間にコンクリートの強度が上がり、ヤング率が上がったためと判定しました。

橋脚は縦波と横波と両方が観察される

橋脚は、その頂部で上部構造を支えますが、巨視的に見れば地盤を支点とした片持ち梁の性質があります。高さの高い橋脚は、通常、橋軸方向が弱軸ですので、橋軸方向の横振動が観察されます。都市高架橋は一本足構造が多く採用されるようになりましたので、橋軸直角方向にも振動します。中小橋梁の橋脚は、基礎の部分を中心としたロッキング振動か、地盤の表面波（横波）が観察されます。同時に、橋脚躯体の高さ方向に縦波が走ります。その加振は、橋梁上を通行する車両の衝撃力が支承を介して伝え、これが地盤に拡散し、周辺の構造物にも影響します。部分的には反射して再び頂部で観察されます。これがリバウンドであって、見掛け上の固有振動数として測定されます。縦波が橋脚を上下に往復する速度は、普通のコンクリートでは秒速 4500m 程度です。そうすると、橋脚の実効高さによって見かけの固有振動数を持ちます。縦波が地盤深くに達して反射してくると、もう少し低い固有振動数が観察されます。この振動数はかなり高いので、マイクロホンを使うオーディオ系のレコーダに加速度計を接続する方法があって、耳で聴いて確認してからオーディオ系の周波数解析に載せます。

どの程度なら振動を許容できるか

橋梁は見掛けによらず、良く振動することを体感します。これは、荷重を受けて変形しても、荷重が抜ければ元に戻るからくる必然的な性質ですので、現象自体は悪い性質ではありません。建築物では、居住空間が揺れるのは居住性の面で問題です。しかし、振動しても体感が無い範囲であれば、建築物として実用になります。超高層ビルがその例です。実を言うと、非常に敏感な人は、超高層ビルの長周期振動を感じて気分が悪くなる、と訴えることもあります。人が、振動していると感じる振動数範囲とその最低振動強さには個人差があり、男女差では女性の方が敏感です。この実測研究には、梶川が興味のある論文を發表しています（梶川康男「振動公害基準値に関する基礎的研究 I / II」日本衛生学雑誌第 33 巻第 2 号 1978-6）。公害振動計は、人が感じない最小レベルの加速度（約 10^{-2}cm/sec^2 ）を基準にしてデシベルで表します。8 Hz で体感が最も高く、それより高いと周波数に逆比例して下がります。大体 50 デシベルが体感の最低レベルであって、100 デシベルが約 100 ガルです。これは一寸した地震時の加速度に当たりますので、橋梁振動で許容できるレベルとしては 90 デシベルまでと考えられます。

幾つかの低周波振動

振動は、周波数が低い場合には周波数の逆数である振動周期の方をパラメータにして説明することが多くなります。振動周期が長くなる（2 秒程度以上）と体感がずっと悪くなりますので、安全性を振動で確認するときには困ることがあります。これは、橋梁の架設段階のとき、構造系が不安定になっているのを体感で知ることが難しくなるからです。音も振動現象ですが、音として聞き分けられる低い方の振動数は、体感振動数よりも高い方にありますので、音としての低周波振動はあまり問題にはなりません。しかし、低い振動数の音が空中を伝わり、それが悪さを及ぼすこともあることが発見されて、これが**低周波振動公害**と呼ばれるようになりました。その範疇に、橋梁から発生する低周波振動が入ります。動物の感覚については想像するしかありませんが、人よりも敏感です。インド洋大津波の際に、低周波音に敏感な象が真っ先に山の方に逃げ出したそうです。低周波公害も、鶏が卵を産まなくなった、豚の食欲が下がったなどの間接的な被害から発見されたことです。

低周波振動のメカニズム

音楽を楽しむ高音質のアンプは、低い周波数の再生に大きなパワー（エネルギー）が必要ですし、スピーカーも大きな直径を持たせます。低周波音で、家を丸ごと揺するほどのスピーカーを考えると、それは非常に大きな直径とそれを駆動する大きなパワーが必要であることが分かります。実は、プレートガーダーの広い腹板は擬似的にこの大きなスピーカー（ウーファー）に相当し、それと向き合う側に音を伝えます。幅の広い道路橋の床版下面は、床組全体が撓み振動をすると、同じく低周波の音を下に輻射します。どちらも、パワーは通行する車両が供給しますので、振幅が大きくなると音のエネルギーが巨大になって問題を起こします。プレートガーダーの場合、下フランジを支える横構を省略した 2 主桁橋で被害が多く報告されました。原因は、フランジ下側の水平構がなく、腹板がぶらぶらと大きく横振動をするためでした。スラブも低周波音の発生源ですが、橋下は住居がありませんが、それが屈折して横向きになって住居に当たる例があります。この遠因は、経済設計を迫及したため、床組みの全体剛性が不足して撓みが大きく出る構造になっているためでした。撓みの大きさは小さいにしても、これも巨大なスピーカーと同じ効果があります。これらの低周波振動は、音としての測定が少し難しいのですが、発生源側の振動測定で確かめることができます。

5.4 地盤の振動

入力と出力の見方

構造物は地盤の上に建設されますので、構造物の振動の性質は、地盤の振動の性質と無関係に議論することはできません。橋梁の場合には橋梁本体の振動に興味向き易く、橋脚・橋台の振動、さらにはそれを支える地盤振動を測定から外すことが多いのですが、それでは片手落ちです。橋梁では、外的な加振入力、主として橋梁上を通行する車両であるためです。さらに、橋梁の振動の性質を取り出したときは、車両の特異な加振の影響がないように整理します。橋脚・橋台・基礎は橋梁本体からの間接的な加振になりますので、特に解析対象に取り上げようとしない例が多いようです。一方建築構造物の場合、風による加振を例外とすれば、地盤からの地震動は建築構造物に対して入力であり、その応答出力が建築構造物の振動になりますので、その両方を同時に測定しなければなりません。橋梁の耐震設計を議論するのであれば、同じように基礎や地盤の振動から注目しなければなりません。これは現象としては単純ではありませんが、多くの情報を含み、種々の解釈を引き出すことができます。

地盤の振動特性は千差万別

音は水中も空中も伝わる縦波ですが、その媒体である空気や水は流体であって、鋼やコンクリートのような弾性材料とは性格が違います。どちらも、縦波は、圧力や応力の変動が伝わる現象です。地盤は振動を伝えますが、流体ではありませんし、そうかと言って、理想的な弾性体でもありません。観察地点が岩盤のように弾性体と仮定できる場合、振動は縦波（音）として伝わり地表に達して部分的に横波に変わります。振動が伝わる周辺の地盤の性質は複雑ですので、単純な力学モデルを仮定することができません。構造物は地盤の上に建設されますが、一応、その局所的な地盤を実用レベルで剛な状態と仮定できるように施工します。マクロに仮定するとき、一体と見なせる剛体のような岩盤上に構造物があるのが理想ですが、プリンのような頼りない地盤上に、あたかも浮いているようなモデルも考えられます。そうすると、地震を受けたとき、幾つかの橋台や橋脚が勝手に動いて、橋桁本体が落橋したり、圧壊したりすることが観察されています。我々が観察できる振動は地表で測定した結果だけですが、それから地下の構造に想像を巡らします。その中でも、興味のある知見を二三解説します。

水を含むと振動に対する性質が変わること

振動を起こす機械装置を設置するとき、振動が周辺に影響を及ぼさないように遮断したいことがあります。その場合、全体を砂利または砂の層で囲うと効果があることが経験的に知られています。この砂利層が目詰まりを起こして硬くなるか、水で飽和されると遮断効果が下がります。鉄道の砂利道床はその応用であって、衝撃は砂利粒間の内部摩擦で吸収します。したがって、定期的に砂利の盛り換えが必要です。しかし、大きな重量を広い範囲に分散させるほどには砂利道床の厚みがありませんので、衝撃を含む振動をすべて遮断することはできません。砂、さらに粒子が細かくなった土は、建設材料としてかなり重要な役目を持っていて、道路や鉄道の路盤、土堰堤の構成に選別して利用されます。工事の際には乱されますので、よく締め固めます。年月の経過で水分が抜ければ圧密も進み、弾性的な性質を持つようになります。しかし、水分が飽和状態で残っていると、内部摩擦が減少しますので、弾性的な性質が下がり、強度も下がります。この状態で振動を受けると、流動化が起きます。これが**流砂現象**(quick sand)です。生コンクリートの打ち込みにバイブレータを使うのも、この性質を利用するものです。

軟弱地盤上の構造物は地盤と馴染ませる

日本は沖積平野を土地利用に多く使います。ここは比較的地下水位が高いので、水で飽和された土の層を介して振動が広い範囲に広がる傾向があります。これは主に地盤の**横波**として観察され、岩盤のような硬い地層を伝わる**縦波**とは異なった傾向を示します。関東平野や濃尾平野などは沖積層が厚いこともあって、構造物の基礎を硬い岩盤まで下ろそうとしても深すぎることがあります。したがって、大きな構造物であっても、その基礎は、言わば軟らかい地層の途中で宙ぶらりんになっていることがあります。利根川の下流にある小見川橋は、そのような宙ぶらりん基礎の上に建設されています。この場所は人家も無く広い場所ですが、面白いことに、橋梁からかなり離れた箇所を重量車が通っていても、橋の上で振動が測定にかかります。このような宙ぶらりん基礎を持つ構造物は、圧密沈下をして、上部構造を嵩上げする必要が起ることがあります。しかし、これはある限度で沈下は止まりますし、案外耐震性もあります。戦前の大きなビルの基礎には松材などを多く使いましたが、地下水位の高い下町の地盤には良く馴染んで、上部構造を健全に支えています。

耐震構造は縦波用と横波用とで異なる設計が必要であること

地震による地盤の揺れは、上下動と水平動とがあるのですが、振幅が大きいのは主として水平動の方です。これは、地下水位の高い地盤では横波として地表を伝播します。上下動は衝撃的な性質が強く現われます。関東大震災のとき、下町は横揺れが大きく、頭の重い瓦屋根の家屋に大きな被害が出ました。その経験を踏まえて、耐震性を向上させる対策に筋交いを入れることが提案されるようになりました。一方、山の手では土蔵の方が大きな被害を受けましたが、これは衝撃的な上下動によるものでした。しかし、土蔵の耐震性向上には目立った提案は出ませんでした。こちらの方は、下からの衝撃を吸収する層が効果的ですが、基礎構造をしっかりと施工することとのバランスを取り難い面があるからです。現状の耐震研究は、殆どが水平振動を対象としていて、上下動についての視点がありません。加えて、衝撃的な力に対しては、衝撃吸収の層や、直接にはダンパーなどの機械的装置があると効果があると予想はしますが、具体的効果は手探りの状態です。

衝撃外力による破壊

阪神大震災のとき、地震の衝撃外力は直下型のこともあって、地下から垂直に上がってきた縦波で多くの被害が出ました。強固な基礎の上に建設された柱状の構造物が縦方向の衝撃波を受け、橋梁では頂部のリバウンドが支承直上の桁を圧壊させ、鉄筋コンクリートの建築物の柱も中層階で圧壊が見られました。衝撃波が弾性材料の中を波動として伝播するときは、加速度にマスを掛けた応力によって伝播します。一般に、柱から伝えられる自重などの力は面積を広く取った基礎構造で分散させて地盤に伝えます。反対に、地震の衝撃力が下から作用すると、広い強固な基礎下面で受けた縦波が、断面の小さな柱に収斂することになりますので、言わば応力集中が起こります。柱の上端が自由端であると、リバウンドして反対向きに走ります。振動の腹が重なると応力は倍になります。柱のような部材で、断面が途中から小さくなると、その分でも、応力は大きくなり、全体が材料の強度を超えると破壊が起きます。そうすると、見掛けの地震の加速度が非常に大きくなったと勘違いすることがあります。強固な地盤上であれば地震による被害が少なくなるとする思い込みは、必ずしも当たらないことを示したことになります。つまり、地盤や基礎構造の性質を無視した、上部構造だけの耐震設計がナンセンスであることを暴露したことになり、免震が新語として登場するようになりました。ただしこの免震は、水平方向だけを考えるのであれば片手落ちです。

主動土圧が作用しているときも良く地盤振動が伝わる

地盤を伝わる縦波は、材料としての土が締め固まっていれば良く伝わります。日本住宅の伝統的な基礎工事で、重い槌で土を締め固める「よいとまけ」をすると、最初は頼りない反応をしていますが、次第に周辺で振動を感じるようになって、締め固めが進んだことが分かります。この振動は、典型的なパルス加振ですので、周期的な性質が見られないと思いきは勝ちです。しかし、前の第4章の図4.1にあるような単位インパルスの応答で、減衰係数の大きい波形が観測されますので、これから固有振動数が分かります。締め固めが進んだということは、図4.1のインパルス応答で言えば、減衰係数 ζ が小さくなることであって、リバウンド分が増加するようになり変ります。平面的に繋がった地盤では、途中に土を乱した箇所があると振動が遮断されます。傾斜した地形の場合、斜面に沿って地盤が積み重なって、主動土圧が上から下まで連続して作用していることがあります。このような箇所は、地滑りを起こした履歴のある自然地形で見られます。人工地形では擁壁や橋台の裏込めの土盛りがあります。傾斜の上側で人工的に加振をすると、下側で振動を測定できますし、逆の場合も観測されます。地盤は、剛性があれば振動が観察されますが、そうかと言って、振動が大きいのも問題です。今後、多くの観測データを積み上げて統計的な性質を解明したいものです。

6. データ解析のソフトウェア

6.1 Visual Basic の利用

自前でプログラミングをする環境が不便になったこと

パソコンが大衆化しましたので、探せば種々のソフトウェアが見つかる時代になりました。しかしながら、科学技術分野では、目的に合った出来合いのソフトウェアがあるのは非常に特殊な場合に限定されています。そのため、ユーザは、小さなサブルーチンの集合を自前のライブラリにまとめておいて、それらを選択して自分用のプログラムに作成することが一つの常識でした。ライブラリの種別のうち、sine, cosine などの基本的な数学関数は需要が多いので、殆どのプログラミングツールでは最初から組み込み関数の形で利用ができます。パソコンの高級化と高機能化に伴って、かなり豊富な関数が利用できるようにはなりましたが、反面、一般ユーザレベルで自前のライブラリを編集することが難しくなってきました。その最大の原因は、プログラミングツールの種類と変更が多くなり過ぎたことにあります。何かのプログラミング言語の利用を目的とした或る時点での自前のライブラリ資産が、次の時点では利用できなくなるのです。そうすると、プログラムを0から書き直すしかありません。言わば、賽の河原の石積みにも似たように、努力の積み上げが壊されて行くような無情を味わいます。筆者はコンピュータ利用の経歴は非常に長いのですが、その大半の努力はバージョン変更などに対応するプログラムの書き直しに費やされてしまいました。

ソースコードでの資産管理が必要

多くのプログラミングツールの商品は、ある年月を経ると、機能を増やして新しいバージョンに変更するを行っています。この場合、以前のプログラム資産を引継ぐには、再現可能なソースコードであると、何とかできます。一番確実な方法は印刷して眼に見える方法で残すことです。テキストファイルとなっていればずっと楽ですが、テープやディスクなどの記録媒体が変わって、読めなくなる被害も受けますので、注意が必要です。オブジェクトコード化されたライブラリや、実行形式のプログラムはコンピュータ本体に保存しますので、もっと惨めです。これは知的財産の喪失になりますので、非常に深刻な問題です。プログラムのソースコードを秘密にするのは、商業プログラムにおいては利益を囲い込むための手段ですが、この習慣も技術移転の上で大きな障害になります。したがって、筆者は、出きる限りソースコードを公開することを信条としてきました。限られた数ですが、ソースコードを含む専門書が出版されてきましたので、これらは形を変えたプログラムの再構築に利用することができます。この章で説明するデータ解析のソフトウェアは、従来から積み上げたプログラム資産を多く含みます。時系列処理やスペクトル解析については、以下の業績を主に参考にしましたので、最初に出典を挙げて感謝の意を表します。

- (1) 北川源郎四郎、Fortran77 時系列解析プログラミング、岩波、1993、ISBN 4-00-007703-1
- (2) 日野幹雄、スペクトル解析、朝倉書店、1997、ISBN 4-254-12511-9 C3341
- (3) 二宮市三他、数値計算のわざ、共立出版、2006、ISBN 4-320-01803-6

Visual Basic への書き換え

一般の人が科学技術計算に利用するプログラミング言語には BASIC 系がよいでしょう。Basic を標榜するプログラミングツールの歴史は多彩です。Visual Basic (VB) は、マイクロソフト社の商品名であって、パソコンの OS が Windows になったことで発売された製品です。そもそも、BASIC は、初心者教育用に開発されたプログラミング言語が出発です。しかし、現在のツールは、初心者向け言語の面影が殆ど無くなって、非常に専門家向けの言語に進化してしまいました。多くのプログラミング資産を VB で利用するような書き換えは相当の手間を食います。これに加えて、入出力に関わるユーザインタフェース部分のプログラミングは、新しくオブジェクト指向プログラミングを応用しなければなりません。そこで、この部分に標準化したプログラムに作製しておいて、本来、プログラミングしたいコーディング部分を繋ぐことを考えます。これが プロトタイププログラム のアイデアであって、「易しくないコンピュータプログラミング」で紹介し、また公開もしています。これから紹介する時系列解析のプログラムも、このプロトタイププログラムに載せましたので、グラフィックスやリストの作成部分のプログラミングを簡単にはしています。プログラムの商品化を意図するときには、中身が見えないように Visual C++ などに書き変える必要がありますが、開発段階で、結果を見ながら弾力的にプログラムを変更したり開発したりする目的には向きません。

Excel の利用も便利であること

マイクロソフト社の商品名になった Excel は、もともとは事務処理を目的とした表計算ソフトです。表の形で整理するデータの計算では統計的なものが多く、その計算に利用する組み込み関数が、科学技術計算においても便利に利用できます。したがって、影響線など、表の形で得られるデータの整理計算に応用されるようになりました。振動データの保存と簡単なデータ閲覧に使うことは、2章でも紹介しました。Excel は、対話型で処理を組み上げるソフトウェアですので、データを読み込んだら、流れ作業的に結果が得られるような利用には向きません。しかし、処理結果を見易い形に印刷するなどの目的には便利です。Visual Basic など、処理そのものに重点のあるソフトウェアは、体裁を整える印刷の機能が充分ではありません。そのため、体裁を整える文書の作成には、Excel を始め、Word などのオフィス系のソフトウェアとの併用を考えます。

汎用のデータ解析プログラムの提案

振動測定からその解析までを一貫させるため、汎用のデータ解析プログラムを公開することにします。研究上の興味は、種々の希望が入りますが、Visual Basic のソースコードは、ユーザレベルでのプログラムで自由に変更できます。ユーザの新しい考えや工夫は、インターネットなどで利用できるように方法を計画しています。標準的に利用できるプログラム名を **TimeProcess** (基本時系列処理の意) としました。これは、生の測定データから切り出してフォーマットを標準化したデータを使います。ソースコードの詳細は、別に紹介します。次節は、どのように処理を進め、どのような結果が得られるか、の見方で参考にして下さい。実橋梁での測定と解析の実例は次章で紹介します。

6.2 処理手順のあらまし

6.2.1 最初の立ち上げ画面<S01>

プログラム **TimeProcess** を立ち上げると、下の図 6.1 のようなレイアウトの画面が表示されます。この画面構成は、プロトタイププログラムを少し変更して、見易いように構成したものです。全体は MDI 構成であって、左の子ウィンドウはモニタ用のコンソール、その下はグラフィックス表示用子ウィンドウです。右側は、テキストエディタの機能を持つテキストウィンドウです。

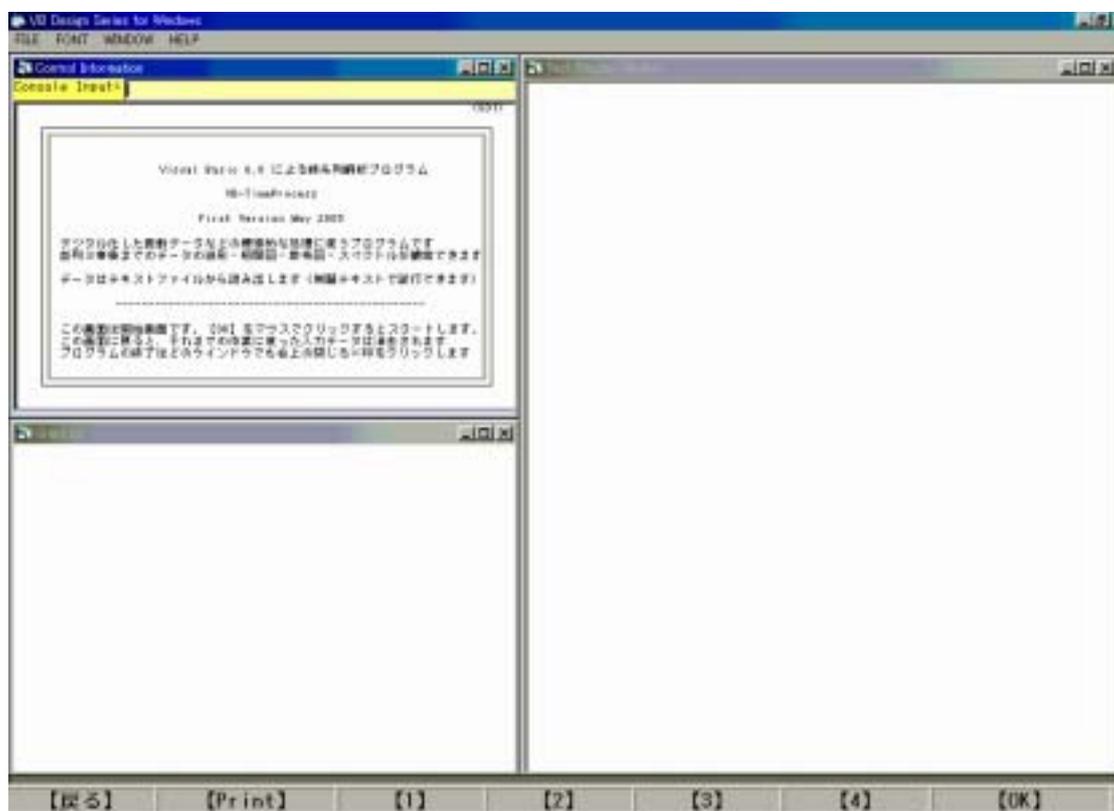


図 6.1 : プログラムの立ち上げ時の画面デザイン

6.2.2 プログラムのステップ

TimeProcess は、カギ括弧<>の番号順で示すステップでデータ処理をインタラクティブに進めます。プログラムがどの状態(ステータス)にあるかは、コンソールウインドウに<S01>、<S02>…のように番号を示し、ユーザが何をするかのガイドが表示されます。ユーザからの指示は、主にウインドウ画面下欄のステータスバーのパネルを選択してクリックします。原則として【OK】は何かの計算をして次の画面に移ります。【戻る】は一つ前の説明画面に戻ります。パネル番号【1】【2】【3】【4】は、主にグラフィックスの表示方法を選択します。説明のない番号を選択しても何もしません。処理の結果は、グラフィックス表示ができますが、上段のメニューを選択すれば、ファイルに保存する、などの処理ができます。グラフィックス表示の元となる数値計算の結果は、【Print】をクリックすればテキストウインドウに書き込まれます。処理の途中でメモを書き込みたいときは、Console Input から書き込みができるようになっていています。メニューにも種々の処理が組み込まれていますが、こちらはウインドウ画面の表示方法を変えるなど、処理の主な流れとは違ったオプション的な作業を指示します。この機能の大部分は、プロトタイプとして準備された処理です。

6.2.3 ファイルからデータの読み出し<S02>

初期画面から【OK】をクリックすると、データのテキスト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、読み込みたいデータファイルを選択します。データの標準的な構造は、並列3現象までの時系列を解析対象とします。これは、前の第5章で、3方向の加速度計をセットにしたハードウェアシステムとのインタフェースを取るためです。下の図2に示すように、最初の行はデータの説明のコメントを記したテキスト、次いで、成分のサンプル数 N_p (例では 512)、成分数 L_p (例では 3チャンネル)、サンプリング間隔 dT (例では 0.01 秒) を読みます。FFT を積極的に利用するため、このデータを見て、内部的にデータ保存用のサンプル数を保存できる最小配列寸法 (2^N) を動的に確保します。そして、次の行からコンマ区切りで $N_p \times L_p$ 個の数値データを読み込みます。データ個数が不足すれば、配列の後半は0が詰まり、実質のサンプル数が N_p より多ければ余分なデータは無視されます。読み込んだデータはオリジナルを内部的に保存しておいて、データの加工などはこれからコピーされた配列を利用します。正常にデータを読み出したら、波形図がグラフィックスウインドウに描かれ、<S03>の画面に移ります。ファイルにエラーがあれば、再度読み出しをするように指示が出ます。

```
FileName = D:\¥VB_TimeProcess¥TimeProcess¥TimeProcess¥減衰振動1.csv
===== Input Time-Series Data Set =====
ID-Code = "DATASET", "Test1"
DataTitle = "TITLE", "較正用減衰振動"
DataSubTitle = "SUBTITLE", "周期2秒"
Date Measured = "DATE", "29-01-2007"
Time Measured = "TIME", "10:37:26"
時分割 dT=0.01秒, サンプル数 Np=2048
Maximum Frequency = 50, Minimum Frequency = 0.048828125
Time Span = 20.48秒
Channels and TimeCounter = "h=0.01", "h=0.02", "h=0.05", "Timer"
0, 0, 0, 0
0.031399324, 0.031399324, 0.031399324, 0.01
0.062747949, 0.062747949, 0.062747949, 0.02
0.094014977, 0.094014977, 0.094014977, 0.03
===== >>> 以下は省略します
```

図 6.2 : 入力データの一例 (減衰振動.txt)

6.2.4 入力データの確認と閲覧<S03>

この画面は、入力データの閲覧が目的です。入力データの要約である平均値(直流分)・自乗平均値(平均エネルギー分)・標準偏差(直流分を除いた実効値)は、テキストウインドウに書き出されます。波形図などは、グラフィックスウインドウの画面に適度に納まるように座標系の尺度が調整されます。ウインドウの寸法を変えると、図形は相似に拡大または縮小して得られ、プリンタに描き出す、またはクリップボードにコピーも効きます。この指示はメニューで行います。このグラフを見て、直流分やドリフト分を除きたい、などの事前加工処理をすることができます。これはステータスバーのパネル番号をクリックして選択しますが、その説明はコンソールウインドウに表示されます。図 6.3 は説明用の作図です。元のデータは第4章図 4.1 の自由振動波形です。

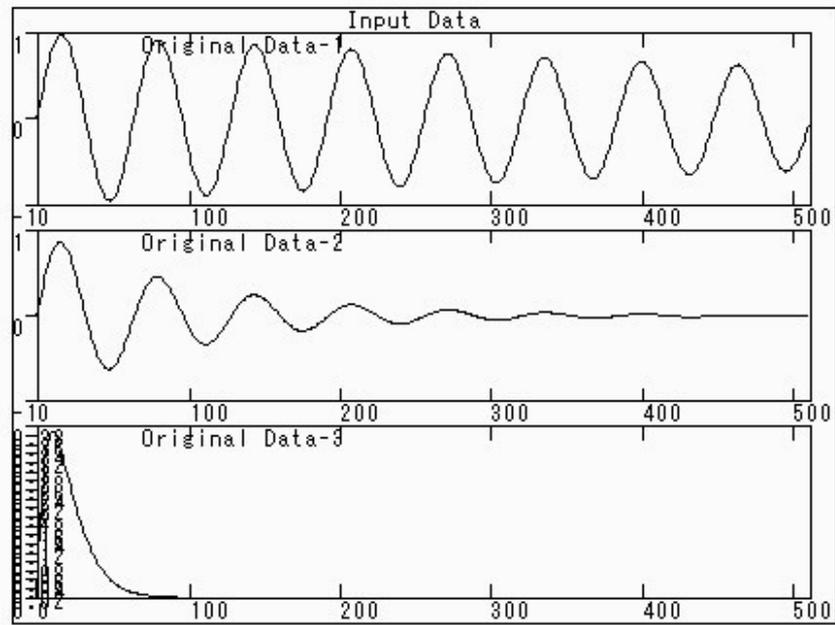


図 6.3：入力データ波形のモニタ表示の例（横軸はサンプル数）

パネル番号に割り当てられている機能は下のようになっています。

- 【1】読み込まれたデータは、加工を加える前の**波形図**をグラフィックスウインドウに描きます（デフォルトの設定です）。
- 【2】データ値の大きさの分布を見る**ヒストグラム**の作図が表示されます。複数の（3事象まで）の場合には、事象間の相関を見るために**散布図**と組み合わせて作図します（図 6.4 参照）。
- 【3】データ値の大きさを小さい値から並べ替えて順序グラフの作図も確認できます（図 6.5 参照）。
- 【4】もしデータの直流分、トレンドなどを修正したいときには、生データの加工を行います。このパネルをクリックすると、オプションの画面<S03A>に変わります。この画面は、<S03>の画面からの入れ子の仕様にしてありますので、その画面からは直接次の<S04>には移行しないで、【OK】をクリックすると一旦<S03>の画面に戻ります。
- 【OK】相関関数の計算ステップに移ります。時間待ちを示す砂時計が表示され、計算が済めば相関関数のグラフを作図し、<S04>の説明画面になります。

（備考：TimeProcess0 は、相関関数を先に計算してからパワースペクトルを求めるようにしてあります。）

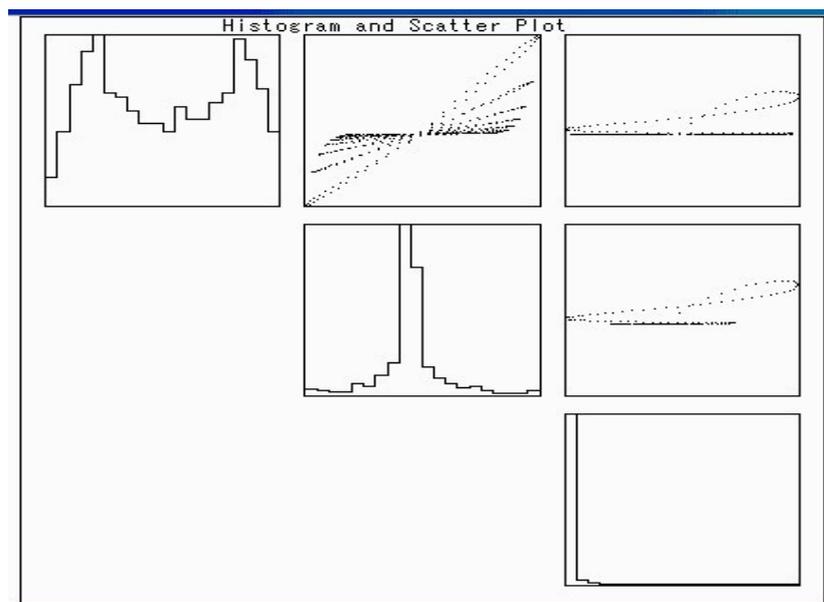


図 6.4： 例題は 3 現象ですのでヒストグラムと散布図が 3 個ずつ表示されます

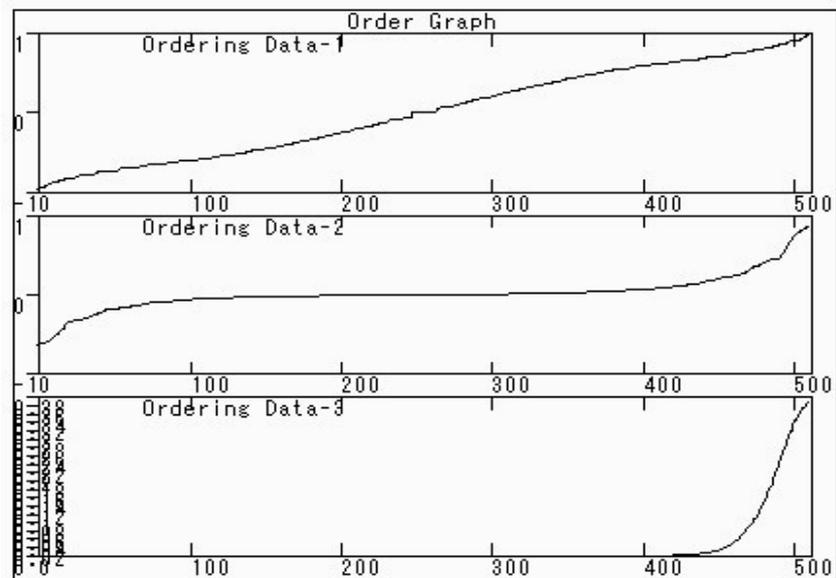


図 6.5： 三現象の入力データの波高を順序グラフで表示した図（横軸尺度はサンプル数）

6.2.5 直流分、トレンドなどの除去<S03A>

元の波形を直ぐに解析処理に載せると多少の不具合が起こりこともありますので、その前に幾つかのデータの標準化処理ができるようにします。元の波形に対して、信号処理のフィルタ処理ではなく、統計処理による波形の事前加工を行います。**TimeProcess** は、振動データの周波数解析と減衰係数の計算に焦点があります。内部処理は、元の波高値のデータから作業用のデータに直します。標準化処理は、自乗平均値を 1 となるように変換します。この標準化処理は、平均値を 0 にするものではありません。波形図を見て、平均値を 0 にする（直流分を除く）、ドリフト分を除く、などの加工処理をパネル番号で選択できます。パネル番号を選択すると、変換された波形がグラフ表示されます。

【戻る】：データ波形の変換をキャンセルして元の<S03>の画面に帰ります。

【1】：データの平均値を 0 にします。信号処理では直流分を除くことに当たります。ただし、必ずしも必須の処理ではありませんので、波形グラフを見て判断します。例えば、図 3 の例図最下段の波形は、平均値を 0 にすると異なった結果が得られます。

【2】：直流分とトレンド分とを除きます。上と同じように必須の処理ではありません。図 3 の最下段のグラフでトレンドを除くと、物理的な意義を失ってしまいます。

【3】：小さな攪乱の消去をします。サンプリングされたデータ並びで、隣接する 4 データに「稲妻形」のような細かな波形が混ざるのは一般に雑音成分です。

【OK】：変換された波形図を解析処理に使うときにクリックします。元の<S03>の画面に帰ります。

6.2.6 相関関数の計算と作図<S04>

相関関数は、調整済み波形データの長さの半分を相関の最大時間差 (time lag) にします。ひるがえって、元のデータ長さは、必要な相関関数時間軸の二倍の長さを入力します。FFT 解析の周波数軸刻み数も入力データ数の半分になることも念頭に入れておきます。事象数が 2 及び 3 の場合には、自己相関関数と相互相関関数を図示します。グラフは 2 × 2 または 3 × 3 の配置で図示し、対角線位置に自己相関関数を図示します。自己相関関数は $\tau = 0$ に対して左右対称ですが、相互相関関数はズラす側を取り替えて計算しますので、非対角線位置の図は向きが変わって連続するグラフです。つまり、 $\tau = 0$ に対して折り返して接続するグラフです。

【1】 自己相関関数と相互相関関数の全グラフを再表示します。デフォルトでは、<S04>の画面に移行したときにこのグラフが表示されています。雑音成分を最小化し、インパルス波形を取り出します。

【2】 ここでの指定は、自己相関関数だけのグラフを表示します。

【3】 自己相関関数を入力波形として、再び自己相関関数を計算します。自己相関関数は左右対称に繋ぎ、解析データ長を 2 倍にして元の振動データと同じ長さに揃えて計算します。

【戻る】 は、**【3】** の再帰的な相関関数の計算をキャンセルして<S03>に戻します。

【OK】 パワースペクトルの計算ステップに移ります。時間待ちを示す砂時計が表示されます。

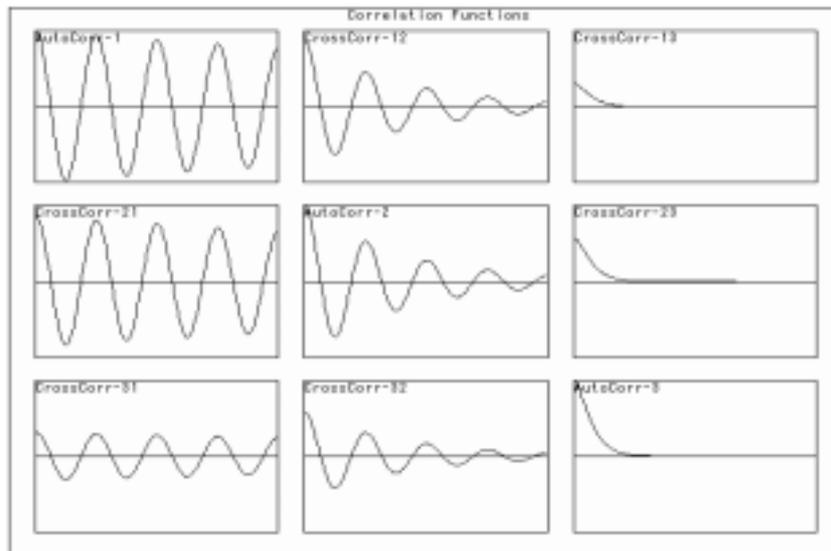


図 6.6： 自己相関関数と相互相関関数とを並べた図、対角線位置が自己相関関数

6.2.7 パワースペクトルの計算と作図<S05>：

パワースペクトルの計算は、自己相関関数の cosine 変換で求める方法を標準処理とします。<S04>から **【OK】** をクリックするとこの計算が行なわれ、デフォルトでグラフが作図されます。このグラフは、パワースペクトルと周波数の座標軸、共に線形尺度です。一方、元の波形図から FFT を使って直接パワースペクトルを計算する方法も用意してあって、パネルの **【3】** または **【4】** をクリックすると計算してグラフが表示されます。また、グラフの表示方法も、比例尺度での表示と、座標軸とスペクトル値も対数尺にしたものが選べます。パネルでの指示は下のようになっています。

- 【1】** 相関関数からコサイン変換して計算したパワースペクトル値を、周波数の座標軸と共に線形尺度で表示します。座標軸はデータ分割数並びです。周波数との対応は、**【Print】** をクリックして周波数尺度の値との対応をテキストウインドウから知ることができます。
- 【2】** 上の **【1】** と同じパワースペクトルを、両対数尺度で表示します。
- 【3】** 元の波形図データから FFT を使ってパワースペクトルを計算します。表示は **【1】** と同じように線形尺度ですので、二つのグラフを相互に比較することができます。スペクトル図に雑音成分が多く含まれているときは、自己相関関数を複数回再帰計算します。
- 【4】** 上の **【3】** と同じパワースペクトルを、両対数尺度で表示します。

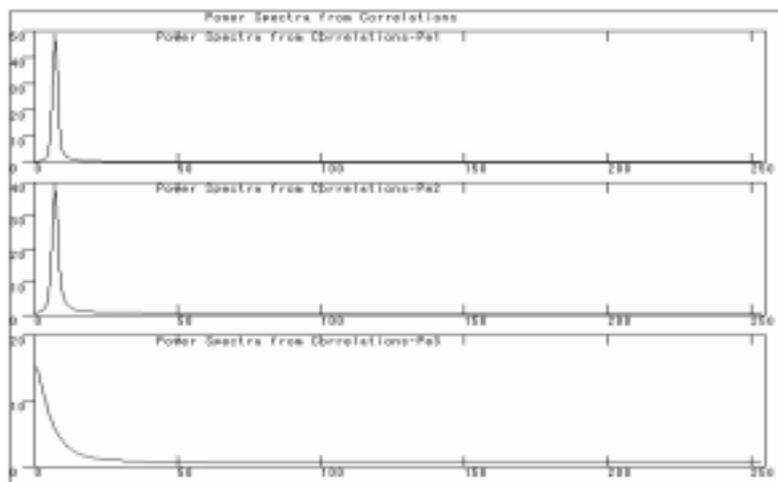


図 6.7： 線形尺度で表示したパワースペクトル

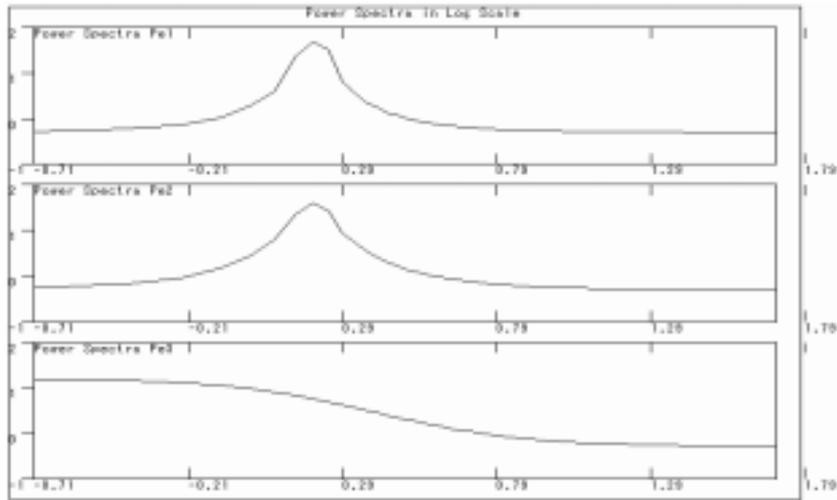


図 6.8： 対数尺度で表したパワースペクトル

6.2.8 自己回帰モデルを使う計算と作図<S06>：

第4章で解説した回帰モデルの説明で、式(4.8), (4.9)を応用して減衰係数 h と固有振動数 n を計算する処理を加えました。入力データは、自己相関関数の連続した4関数値を使い、注目点をずらしながら複数の値を計算し、グラフに表示したものです。計算値は【Print】をクリックするとテキストウインドウにリストが得られます。例題に使った波形図は理論的に合成した減衰振動のグラフですので、計算値は正確に $h = 0.01, 0.1, 1.0$ と求まり、周波数も 1.562Hz の一定値で得られます。ただし第3チャンネルは波形高が途中から0になりますので、右端のグラフはゴミデータです。一般的な振動データの計算では、この数値計算はあまり綺麗には求まりませんし、減衰係数もやや高めに計算されます。

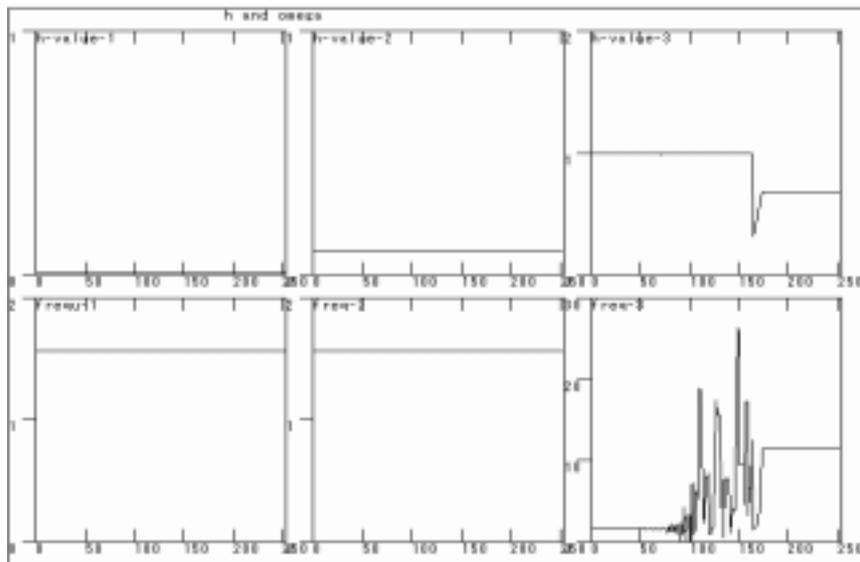


図 6.9： 自己回帰モデルによる減衰係数（上）と振動周波数の計算をグラフ化

6.2.9 報告書用に結果を整理した表示

時系列データの解析プログラムは、データ解析をインタラクティブに進めるようにしてあって、結果の表示の種類が多く準備されています。これを見て、報告書用の原稿に選んで整理します。図 6-10 は、その一例であって、解析一単位を A4 用紙 1 枚にまとめたものです。

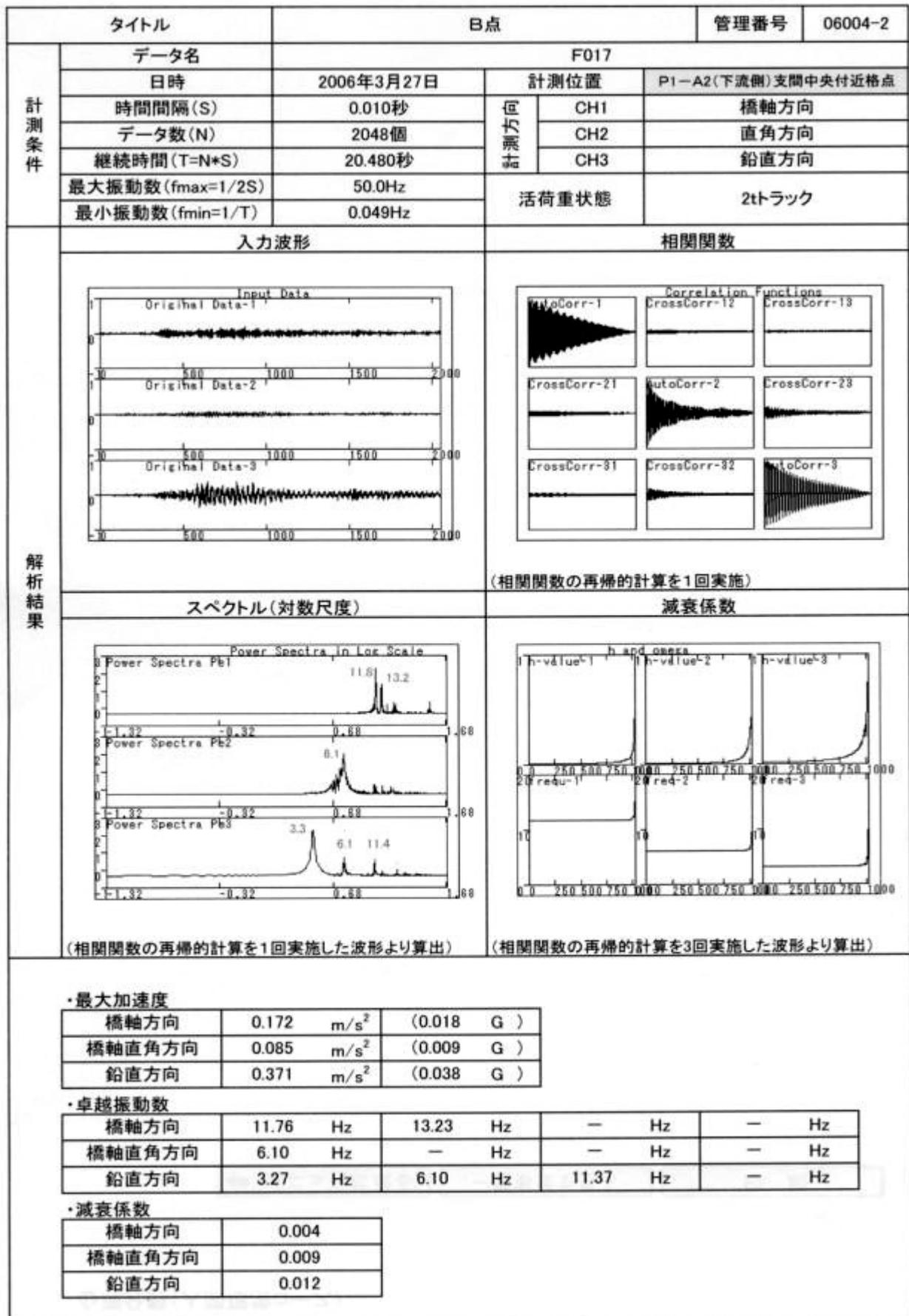


図 6.10 : 測定結果を一覧表示にまとめた一つの例

7. 振動解析に利用する理論の解釈

7.1 測定論

コンピュータは賢く使うこと

構造物の振動現象は、人の五感で体験できる範囲の現象ですので、物理的な測定をして結果を数値化したものを見るときは、それを自分の経験に照らして納得するところがあります。地震の震度は、その典型です。しかし、感覚の範囲を外れている場合、または、体験する場に居合わせていない場合、数値化された結果を感覚的に比較して判定する基準がありませんので、今一つ納得が行かないことも起こります。振動データの解析はコンピュータで処理することが多くなりましたので、処理結果の正当性にコンピュータの利用を挙げるが多くなりました。一般の人は、数値化されたデータを見て、「そんなものか」で済ますようになりました。構造物の振動解析の理論的な柱は、スペクトル解析と構造解析の二つです。それをプログラム化したものの代表が、高速フーリエ変換(FFT)、有限要素法(FEM)の二つです。コンピュータ処理単独は、ソフトウェア的に信頼が置けるとしても、その前後の判断が的外れしていると、おかしな結論が得られることも起こります。したがって、振動測定の計画から結果の判定に至るまでの総合的な流れについて、合理的な設計と賢い運用が必要です。これを測定論とします。

標準化の功罪

科学的・学問的な態度は「疑って掛かれ」で始めます。対立するのが宗教的な態度であって「信じなさい」が出発です。疑いを晴らすために、種々の客観的な方法が採られます。これを傍証と言います。測定では、まず、センサーなどの測定装置は、検定などで正しさの確認を行います。測定作業では、複数のデータを取り、また、原理の異なる測定を組み合わせるなど、相互比較ができるようにします。測定方法を標準化する考え方は、一つの測定方法を強制するところがあって、やや権威的・官僚的な発想ですが、多くの独立した測定結果を統計的な相互比較に載せる上で意義があります。振動解析はコンピュータ処理が常識になりました。ブラックボックス化されたソフトウェアを利用することは一種の標準化処理の強制に当たります。そこに「コンピュータを信じなさい」が顔を出しますので、学問的な方法論と対立することがあります。したがってソフトウェアの方も傍証を必要とします。

対象によってシステム構成が変わること

振動現象の測定対象は、非常に広い専門分野に広がっていて、それぞれに測定から解析までのシステムに特徴があります。これまでの論説では、筆者の専門に関わる橋梁構造物を主な対象としていますが、この場合でも、主構造だけでなく、二次部材や床版などの挙動を理解する必要があり、さらに橋脚・橋台、それを支える地盤特性にも視野のあるシステムを提案する必要があります。建築構造物は、橋梁構造物と親戚関係にありますので、ある程度の融通が利きます。しかし、自動車・航空機など、電気機械産業の装置を対象とする場合とは、大きく異なるところがあります。それは、振動源が外部にあるか、内部にあるかの相違です。橋梁の場合、加振は、主に橋梁上を通行する車両です。建築構造は、そもそも居住空間が揺れることを許しませんし、人の移動で揺れるのは論外です。したがって、加振は地震時しか考えません。どちらも振動は受身の現象ですので、振動の周波数と強さをどの範囲で考えればよいかが問題になります。低周波振動と騒音は、それまでの感覚的な周波数範囲を外れた現象です。したがって、測定センサーの選択からシステム構成を別に考えなければなりません。電気機械装置では、装置自体に振動要因を持つのが特徴ですので、測定対象の範囲を限定することができます。結果として、測定システムの設計も単純化できます。

システム構成は汎用か専用かを考える

地震計は典型的な専用の振動計測システムを構成します。機械装置の振動計測には、ハンディな測定器を便利に使うことができます。構造物の振動計測では、場所も対象も狭く特定できませんので、ハードウェアには汎用のシステムを考えても、個別の対応をソフトウェア的に解決する方法を考えます。第5章と第6章で解説したように、ハードウェア的には、3成分の加速度計のセットで、ソフトウェア的にはその3成分単位で解析をするような標準化を考えました。これは一種の専用システムの提案ですので、定型的な解析ができます。しかし、対象次第で対応ができるような汎用も意図しています。この場合、或る程度の理論的な背景を理解して応用することが望まれます。その留意事項も広い意味でソフトウェアに含めますので、そのことをこの章でまとめました。

7.2 FFT 解析の応用と見方

パワースペクトルは工学的な意義があること

構造物の振動データを解析するとき、固有振動数を求めることに重点を置くことは当然です。この整理は、数値として低い方から1次、2次、3次のように表すと共に、全体の傾向が分かるスペクトル図で表します。数学的なフーリエ係数は、sine成分とcosine成分を別に扱いますので負の値も計算されます。通常は、同じ周期成分を合成したベクトル成分の絶対値で表し、位相角は扱いません。工学的にはベクトル成分を2乗した値でスペクトル図を描き、これをエネルギースペクトル、またはパワースペクトルと言います。ベクトル成分の絶対値を表した方はフーリエスペクトルと言います。この区別は、電気信号の周波数特性を表す方法に起源があります。電気信号の電圧波形はフーリエスペクトルで表すとしても、この現象の電気エネルギーは電圧信号の自乗を計算することになりますので、パワースペクトルに整理したスペクトルを使います。電気関係から来た単位にデシベルがあります。この単位は相対的な電圧比の常用対数に20を掛けます。したがって、電圧比が10倍のときを20デシベルとします。なぜ常用対数の10倍でなく20倍であるかは、エネルギー比に換算するためです。構造物の振動も運動エネルギーの発露ですので、速度の波形分析からパワースペクトルを求めるのが物理的に正しい扱いです。しかし、便宜的に、加速度波形を使ってもパワースペクトルの形で整理します。そのため、振動数の高い方でスペクトルが大きく計算されることを理解しておく必要があります。二つ以上の固有振動数が求まったとき、エネルギー的に、どちらがエネルギー的に大きいかを判断しなければならないときに、単位の選択を踏まえないければなりません。

スペクトル図は確率分布の意義を持つこと

スペクトルという言葉は、星の光の分析に利用される用語が始まりです。光の線スペクトルは物理的に明確な意義を持っています。構造物の場合、或る明瞭な固有振動数を持つ場合であっても、鋭い線スペクトルではなく、山状に分布するスペクトル図が得られます。山が鋭いか、なだらかであるか、を表すパラメータが減衰係数です。ピアノなどの弦楽器の弦は、減衰係数が非常に小さいので実質的に線スペクトルが得られます。幅を持つスペクトル図を描くとき、座標軸の尺度を両対数にすると、減衰係数が同じである振動は、周波数が異なっても、山の形が相似になります。このことを考えて、スペクトル図の作図では、座標軸を線形尺度で描く場合と両対数で描く場合とが選択できるようにします。スペクトルのピークが鋭い線ではなく、山を描くことは、その振動体が自発的な振動発生源ではないことも意味していて、外からの攪乱力に引きずられて振動する性質を示します。そうであると、攪乱力次第で固有振動のピークが異なって現われます。例えば、橋梁の場合、通過する車両の重量が大きいと固有振動数のピークは低い方にずれます。そのため、スペクトル図は、振動の起き易さの確率分布を表すと解釈します。このことを含みにして、数値解析をして固有振動数を表す場合、数値の精度を神経質に考えるのではなく、有効桁数として2ないし3桁に抑えます。数値計算をすると、近接して幾つものピーク値が得られる場合がありますが、それらを個別に扱うか全体の包絡線で考えるかの吟味が必要です。これは単発的なデータ解析では判断できません。

ランニングスペクトル

電気機械装置は、その本体に周期的な振動要因を持つことが多く、その振動を、同じく電気機械的に制御することも行われます。自動車エンジンの回転数を考えれば分かるように、どのような振動成分が発生するかは、ある程度予測が立ちます。構造物の場合、振動は外からの攪乱力による応答で観察される事象ですので、どのような振動成分が測定されるかを予測することができません。さらに、本体と二次部材とは関連を持つ場合と独立に振舞うことが混ざりますので、それらを分離して取り出す測定と解析方法に工夫が必要です。スペクトル解析は、幾つかの振動成分を分離する目的に利用します。しかし、構造物の振動では、或る振動成分が、出たり出なかつたりする不確かさ、つまり確率を持ちますので、単発的な測定では見つけられないことも起こります。また説明に苦しむような結果が得られることもあります。そこで、単発的なスペクトル図ではなく、注目時間をずらしながら複数のスペクトルをならべ、それらのグラフの時間的な変動を観測すると、散発的に観測される振動成分が、解析のゴミであるか、意義を持つかの判断ができます。このような図を、ランニングスペクトルとすることにしました。図の表現方法には工夫が必要ですが、図7.1は地震波形をランニングスペクトルで表した例です。なお、連続スペクトルと言う用語は、線スペクトルの反義語として使います。ランニングスペクトルと同質の表現には、音声解析での声紋があります。なお、running mean という用語は移動平均のことです。

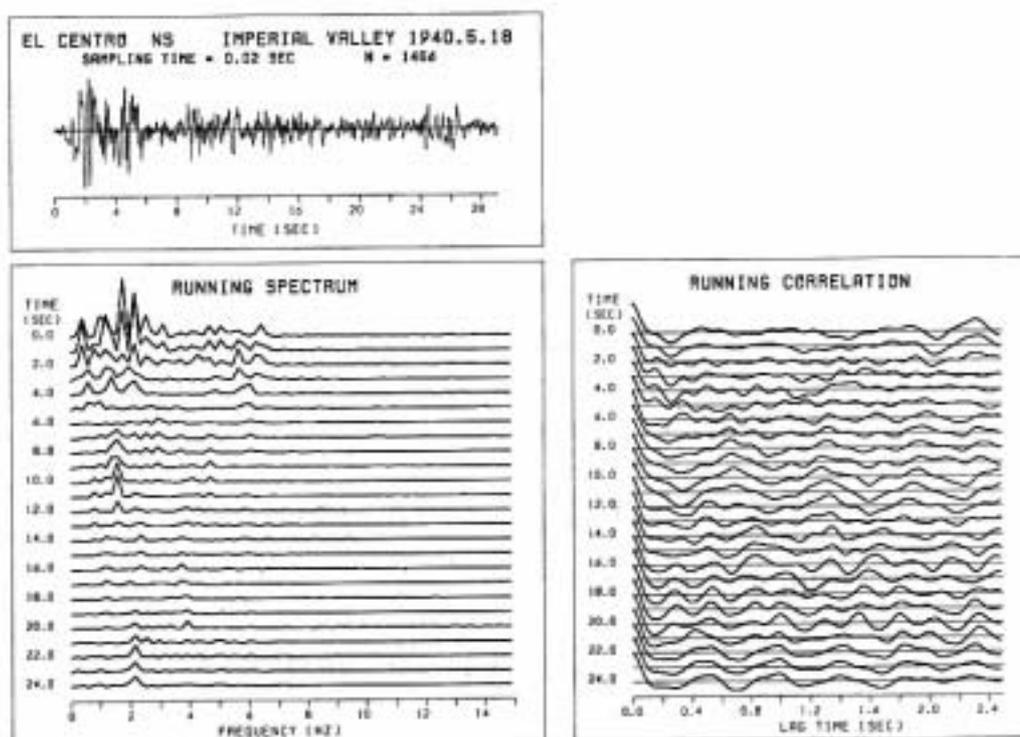


図 7.1 ランニングスペクトル表現の一例 (E1 CENTRO 地震波を解析例としたもの)

長周期成分を取り出すときは自己相関関数と併用する

フーリエ解析は、波形から周期成分を分離して取り出す道具ですが、それを過信するのは禁物です。ランダムな事象の中に隠されている周期的な性質を求めるときは、自己相関関数を使い、これをフーリエ解析に載せる方が良い結果が得られます。ランダムな事象は、相関関数を求めると、相互に打ち消し合って周期成分を残します。この性質を応用したものが、気象レーダーや航空機識別のレーダーです。意図的にランダムな電波を発信して対象物からのエコー（反射波）との相互相関を求めると、或る時間差のところで相関値が極大または極小となり、それ以外の場所では実用的に0となります。この時間差から発信地と対象物との距離が得られます。ランダム波を使わないで、周期性のハッキリした波を使うとゴースト像が多く現れて実用になりません。地盤の長周期の振動は、地盤を伝わるランダムな縦波が反射するエコーの時間差であって、地盤自身がゆっくりと横波状の弾性変形をするものではありません。したがって、地盤振動を単純にフーリエ解析に載せても、長周期の振動成分は雑音の中に埋もれてしまいますので、解析に掛かりません。このエコーは自己相関関数を計算すると見つかります。

自己相関関数を再帰的に計算する

相関関数の計算は、何かの振動波形から、ランダムな雑音成分を除いて、周期的な現象を強調する結果が得られます。こうして得られた波形について、再度相関関数の計算を行わせると、相対的に更にランダムな性質を減らす計算になりますが、周期的な成分は残ります。この計算処理は一種のフィルタリングですが、物理的なバンドパスフィルタの意義ではなく、統計的な処理のフィルタです。ランダム波形の中に隠されている長周期の性質を取り出すとき、自己相関関数を再帰的に計算すると、長周期の性質が段々と顔を出してきます。計算例を図 7.2 からのシリーズで示します。このサンプルは、橋梁上で騒音の計測をしたデータを使いました。騒音レベル計で 0.1 秒間隔 10 分間の測定をしたものです。サンプリング間隔が粗いので、音としては 5Hz 以上がカットされますが、音の塊が約 2 分の長周期で現われることが分かります。これは、自動車交通量が交通信号によって区切られることを反映していると推定しました。生のデータ (図 7.3) は一見してランダムであることが分かります。これを、そのまま FFT を使って周波数解析をすると、図 7.8 の様に得られ、卓越した周期現象を指摘することはできません。このデータを、再帰的な計算を含め 3 回の自己相関関数を計算すると明瞭な周期性が現われてきます。この周期は、音とは性質の違うものです。

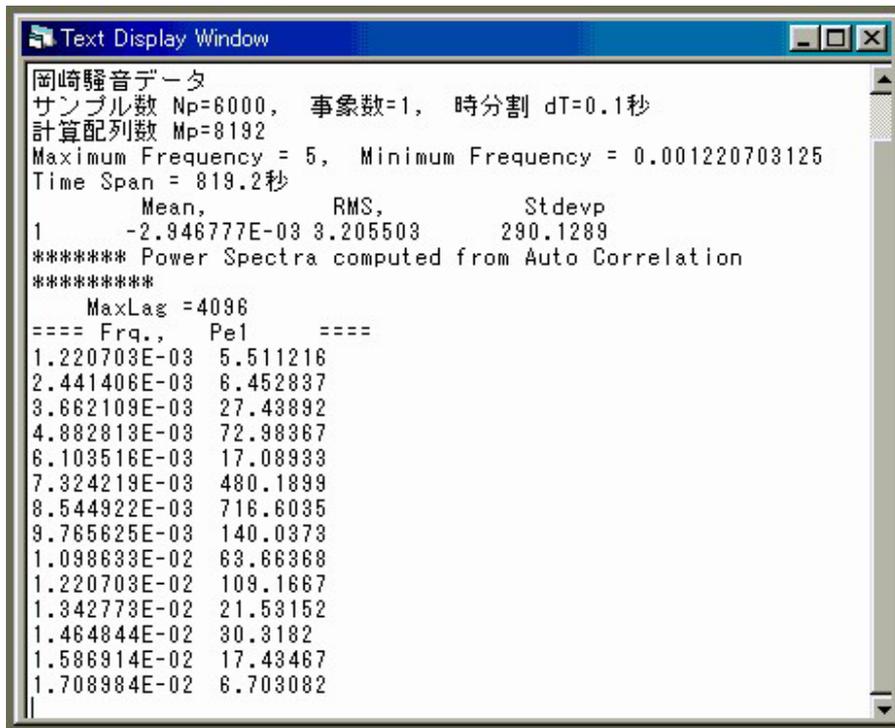


図 7.2 騒音データの解析に使用したデータと周波数解析結果のリスト (後半省略)

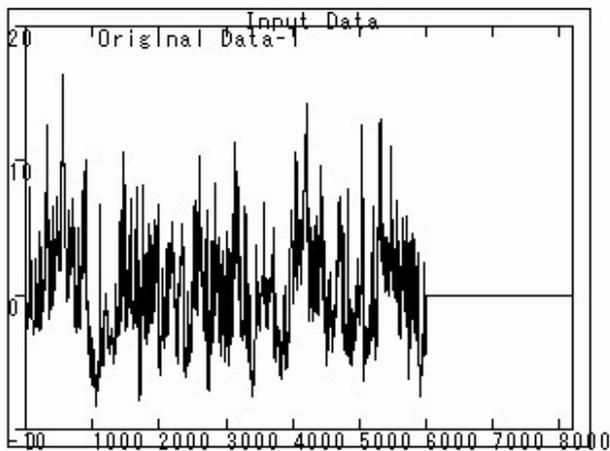


図 7.3 解析に使った生のデータ

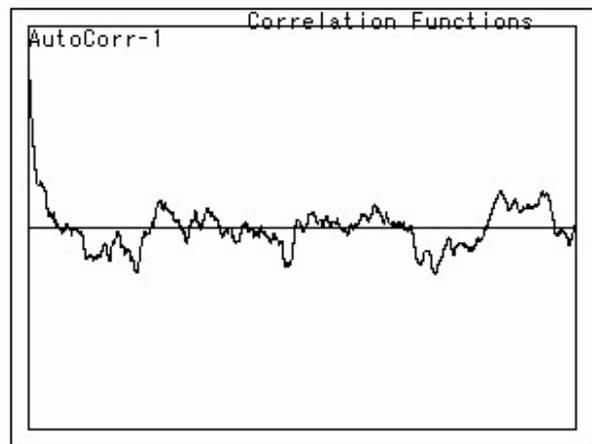


図 7.4 最初の自己相関関数のグラフ

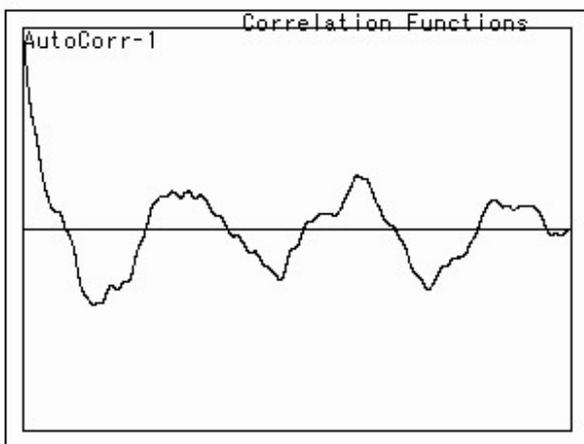


図 7.5 再帰的な自己相関関数の計算 (1回目)

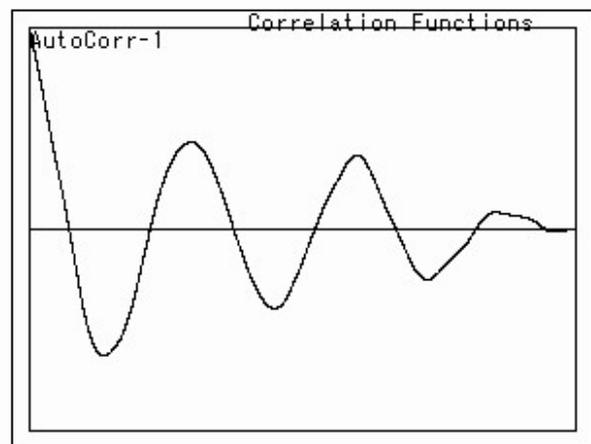


図 7.6 再帰的な自己相関関数の計算 (2回目)

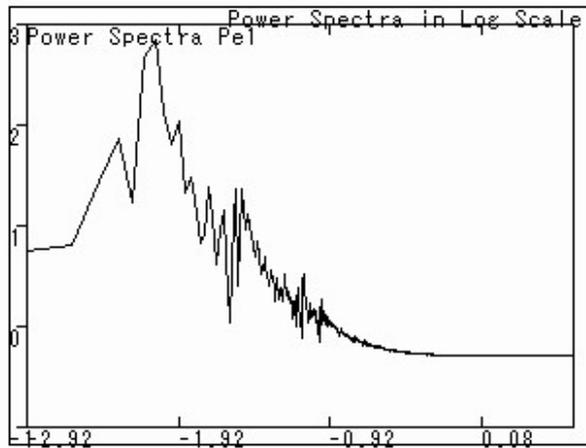


図 7.7 最後の自己相関関数から求めたスペクトル

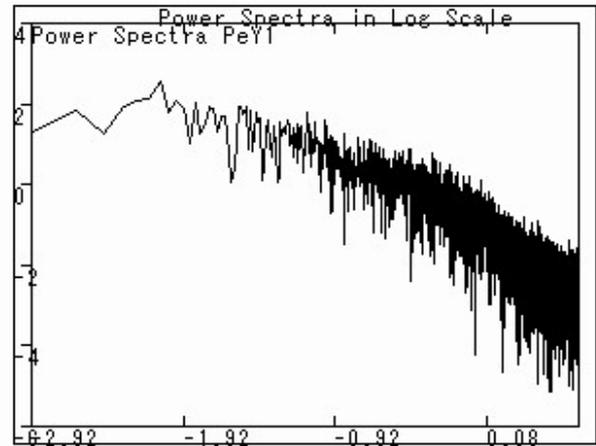


図 7.8 生データから計算したスペクトル

自己相関関数は衝撃応答を取り出す

橋梁構造物は、荷重が作用すると変形し、荷重が抜ければ元に戻ります。これは橋梁に弾性的な性質があることですので、結果的に振動が観察されます。しかし自分で振動を発生するのではなく、自動車などが作用することによる衝撃で起振されます。一つの衝撃が作用すると、自由振動が起りますが、これは、減衰振動を示します。もし衝撃外力が、連続的に、かつランダムに作用すると、強さの異なる減衰振動が時間的に重畳します。橋梁の弾性的な性質が線形であると、この減衰振動は線形的な加算で重畳されます。これは、数学的には畳み込み積分と言われるものです。ここで、橋梁の振動波形を自己相関解析に載せると、衝撃応答を強調する波形が得られます。同時に、加振側の時系列の性質が重ね合わさって計算されます。ここで、加振側の時系列にランダム性があると、加振側の相関が打ち消され、結果として橋梁本体の減衰振動が残ります。この原理を応用することで、橋梁本体の振動の性質を精度よく計算することができます。自己相関関数とパワースペクトルとは数学的には相互に変換できます。自己相関関数からパワースペクトルを計算するのは cosine 変換ですので、この計算のときに cosine 変換部分を使って FFT を利用します。

パルス状の現象はランダム波の特殊な場合になること

一定時間間隔でパルス状に発生する事象は、周期現象であると見なすことができます。しかしこの現象を数学的なフーリエ解析に載せると、すべての周波数範囲で一定の強さが計算されて、その結果だけを見る限り白色雑音と同質の事象と判断され、明瞭な周期成分を取り出すことはできません。また、感覚的には周期性があるように見えても、その周期が一定しない現象があります。この例は、毎年来襲する台風や、それに原因のある高波などであって、年周期の性質があります。こちらの方は確率過程 (stochastic process) の扱いをします。周期性はありますが、その周期性に確率的な性質を持つ場合に、**再現周期** (return period) の用語を使います。例として少し適当ではありませんが、サイコロの目の出方で説明します。例えば 1 の目の出る確率は $1/6$ です。これは、6 回目前後に 1 の目が出る周期性を意味するものではありませんし、また 6 回目に出る確率が高いのでもありません。しかし再現周期が確率的に 6 回目にあると言う表現は間違いではありません。そうすると、出る目の確率に偏りがあるのが、いかさまサイコロになります。橋梁の場合、加振源となる自動車の重量と通過台数は確率過程の性質があって、疲労設計のデータとして注目されるようになりました。現象としては、大きさの不揃いなパルスが、時間的にもランダムに現われます。計測システムは同じものが使えますが、データの整理方法、つまりソフトウェアが異なっていて、ピーク値を選択的に取り出します。この解説はここでは触れません。

人工的なランダム波と自然のランダム波

理論的に完全なランダムな事象を**白色雑音**(white noise)と言います。自然光をプリズムに通すと種々の色成分を含むのですが、その総合は色がありません。この類似を振動現象一般にも適用します。スペクトル図を求めたとき、すべての周波数に渡って、実用的に同じ強さを持ち、どこにも目だつた山も谷も無い事象が白色雑音です。テレビ受像機で、何も放送の無いチャンネルを選ぶと、画面に不規則な白黒模様が現れ、音もザーと流れます。これは典型的な自然現象に基づく白色雑音です。一方、レーダーに応用する擬似的なランダム波は、人工的に発生させなければなりません。数値計算の場合には乱数を発生する関数が必要ですが、数学的に見て、クセの無い、理論的な白色雑音的な乱数を作成することの研究があります。橋梁振動の性質を測定したいとき、白色雑音的な攪乱力を作用させて応答波形を解析すると、精度よく固有振動数が計測できます。この雑音には地盤から伝えられる常時微動や、強風時の攪乱力を考える方法があります。ただし振動レベルが低いので、橋梁の場合には荷重車を適当に走らせることでランダムな攪乱力に代えます。建築構造物は、もともと振動しないことが基本ですので、ランダムな加振は地震待ちが多くなり、結果的に人為的な加振による振動測定と解析の機会が殆ど得られません。

7.3 構造解析の応用と解釈

振動解析に使う集中質点のモデル

振動測定結果が合理的であることを検証するためには、対象となる振動体の動力学的な挙動を理論的に求め、それとの比較をすることで振動の性質を納得します。このときの仮定が振動モデルです。振動モデルは、振動測定の結果を説明できるように仮定します。一つのモデルに執着するのではなく、マクロに見て現象を良く説明できれば良しとします。そのモデルの定番は、重さの無い静力学モデルの要所要所に、その周辺の自重をまとめた集中質点(lumped mass)を付着させる**質点モデル**です。橋梁の上下動の場合、最も単純化した動力学モデルは、支間中央に、全橋梁の半分の質量がある1質点1自由度のモデルを考えます。乱暴な仮定のように見えますが、実用的には充分の意義があります。立体的に考えると1質点は3方向の運動の自由度がありますので、上下動だけに限るモデルであることを強調するために1質点1自由度と言います。立体的には、一つのマスは回転成分を含めて6自由度があり、そのモデルを**慣性モデル**と言います。こちらは扱いが難しいので、複数の質点の組でモデル化します。

橋梁を多質点モデルで扱う考え方

仮に単純桁橋を対象とし、その上下動だけに注目するとき、曲げ変形の微分方程式に根拠を持つ理論解を考えます。このモデルは、微小な質点が連続しているモデルですので、その固有振動数は、第1次の振動数を基準として、1, 4, 9, 16 … n^2 … 倍のシリーズが得られます。実際に振動測定をすると、条件の良いときでも、せいぜい三次までの固有振動数を確かめられれば大成功です。現実的に橋の挙動を考えると、第二次の固有振動は橋の中央に節のある逆対象の振動波形です。高次の固有振動は、節の数が2, 3, …のように増えることですが、橋桁が蛇の胴のようにクネクネと曲がるとは思えませんので、あまり高次の振動は出ないと想像できます。そうであると、仮に三次振動までをモデル化するのであれば、質点3個のモデルを仮定すればよいことになります。この場合の解析モデルは、質点の位置を格点、その格点間を重さの無い梁要素で繋ぎます。このように考えると、一応、有限要素法(FEM)のモデルで扱うことができます。正確な計算が欲しい人は、例えば支間を10等分する、などのように目の細かいFEMモデルを好むでしょうが、質点数をやたらと増やすのは必ずしも賢い選択とは言えません。

振動モードの順と振動次数の順とは違う性質であること

単純桁橋の固有振動時の理論的な変形形状は、両支間に節を持つ sine 波形であって、支間を n 等分するように半波長の sine 波形が並びます。これを、 $n=1$ から順に一次・二次・三次のように呼び、振動数も同じように n^2 の順で大きくなります。ピアノを始め弦楽器の場合には、弦の曲げ剛性が小さいので、振動数は n の順で大きくなります。橋梁の場合、振動モードと振動数の順がいつでも同じ順であるとは限りません。アーチや吊橋の場合、最も固有振動が低くなるのは支間中央に節のある、逆対象振動波形の場合があり、sine 波形の振動モードの順と、振動数の順とは同じになりません。振動測定データを周波数解析に掛けると、幾つかの卓越振動数が得られますが、低い振動数から順に一次・二次・三次と単純に割り付けると実情に合わないことが起こります。それは、橋梁が立体的な構造物であるために、曲げの他に捩れが入るなどのためです。上下動の固有振動数が、近接して7次、8次までの高次数まで求まるときは、振動数の大小で順位を言う分類であって、必ずしも振動モード順にはなりません。また、捩れ成分があると、見かけ上、上下動の成分と混ざります。幅員の広い道路橋では板の性質を持つことがあって、振動数の低い順にどのような振動モードが対応するかの吟味が必要です。

質点一つで3自由度を持つこと

橋梁は、立体的な構造物ですので、当然、立体的な挙動を示します。普通の単純橋は、基本的に、上下動、橋軸直角方向の水平動、そして捩れ振動が主な成分です。これを最も単純に表す質点モデルは、2主桁構造を考えて、各桁の支間中央に一つの質点を置いた、全体として2質点モデルです。立体的に考えると、質点一つは3方向の運動自由度があって、この動力学系は6自由度を持ちます。しかし、二つの質点間の距離は固定されています。橋軸方向の水平動と、橋が水平面内で回転することも無視できますので、結果的に上で挙げた3つの振動成分が残ります。実際の振動測定では、捩れ振動は上下振動と合わさって得られますので、上下振動を単独に解析しただけでは、この区別ができません。これを分離するには、橋幅員の左右で、上下動を対にし、同期を取って測定する、また解析の場合にも位相を考える、などの注意を払います。トラス構造のように全体の橋の高さが高い場合には、捩れ振動は橋軸直角方向の水平動成分にも出ますので、その結果から捩れ振動成分であると判定できることがあります。

構造系についての確認が必要であること

構造物の振動の性質を理解するためには、少し遠回りのように見えますが、構造物を力学的な観点から一つ二つと数える構造系の考えかたが必要です。一つの構造系とは、それを単独に取り出しても形が崩れない単位であって、構造力学的に言うと、内的に安定な構造を指します。その最小単位が部材です。その構造系を任意に静的に支えておいて、その構造系のどこかに力を作用させると、その影響がその系全体に関係するような単位です。構造物は、幾つかの構造系の組み合わせで複雑に構成したものです。単純橋が連なった長い橋梁では、個々の単純橋が独立した構造系であることは理解できます。しかし、見掛けは一つの橋単位でも、実は独立した構造系が、緩やかな拘束で接続している場合があります。典型的な例は中央が吊桁になった三径間のゲルバー構造です。これは独立した構造系が三つ繋がっています。第一径間に荷重があるときは、第二と第三径間は応力的には無関係です。ただし、第二径間は第一径間の変位の影響を受けます。同じような性質は、簡単な二主桁の単純橋にもあります。横桁で繋ぐ構造であっても、主桁の振れ剛性が小さいか、横桁の曲げモーメントが主桁に振りを伝えなければ、横桁と二つの主桁は構造系としては独立です。そうすると、左右の主桁は独立に挙動します。この全体を一つの橋と見ると、左右の主桁が同じ撓みで振動するのと、左右の桁で上下反対向き、つまり、見掛け上の振れ振動が観察されます。しかし、この二つの振動数は殆ど同じになります。格子構造の桁橋では、主桁の本数が多くても、振れ振動と撓み振動の振動数が近接して測定されます。このような構造系を、機械的に FEM の計算に載せると、静的な解析はできても、動的な解析では不具合が起きることがあります。

数学的に独立な構造系

固有振動を求める数学的な方法は、力と変形の関係を表す対称なマトリックスの固有値解析に載せません。このときに計算される複数の振動モードは、数学的な直交性があると同時に力学的な性質の独立性と関連を持ちます。橋の上下動は、橋軸直角方向の水平動と振れに対して独立して扱うことができますので、振動方程式を立てるときは独立に扱うことができます。この場合には平面構造力学が応用されます。そして、種々の振動モードは、数学的には独立した構造系として扱うことができます。一方、水平動と振れとは相互に関連を持ちますので、これを扱うとなると上下動も含めた立体的な見方が必要になり、一挙に難しい問題になります。鉄筋コンクリート床版を持つ桁橋では、床組構造と合わせて横方向の変位に対して大きな曲げ剛性を持ちますので、水平動を無視することができます。したがって振れを独立に考えれば良いのですが、振れの扱いに関しては、理論的にも実験的にも経験不足が否めません。しかし、橋梁振動を理解するためには振れの理解を避けて通ることはできませんので、簡単な解説をしておきます。

普通の桁橋は曲げ振れが主体であること

簡単な桁橋は、二本の主桁を並べ、それに横桁を単純に載せた形で繋がります。この場合には横桁は荷重分配に効きませんので、一つ的主桁に荷重が載ると反対側は遊びます。見掛け上、橋は振れますが、これを**曲げ振れ**と言います。左右の桁を含めて全体を箱桁にすると、多少の偏心荷重が作用しても左右の桁は殆ど振れを示さないで撓みます。この場合の振れを**単純振れ**と使い分けます。実際の桁橋は、曲げ振れと単純振れが複合するのですが、後者の性質を計算して確認する手立てがないので、設計計算の仮定は単純振れを考えません。トラス橋の場合も単純振りを意識しませんが、桁高が桁橋よりも高く、上下の水平構と主構とが擬似的に箱断面を構成しますので、単純振れが測定に掛かるようになります。筆者の最近の測定経験では、幅員の広い桁橋では単純な撓み振動と見掛けの振れ振動の振動数が近接して得られたのに対し、トラス橋では明らかに別の振動数が測定されました。振れ振動成分は上下の撓み振動成分に重畳する形で測定に掛かります。単純振れの影響が小さいと振れ振動数は撓み振動数と近接して得られますが、振れ剛性が上がると振れ振動数が相対的に高く得られます。

動力学モデルは静力学モデルを補正して使う

橋梁の振動を解析的に求めるときは、動的解析のモデルを考えるのですが、それにFEMモデルを応用することが多くなりました。精密な解析をしたいとして、メッシュ数を細かくし、すべての格点にマスを貼り付けたくくなりますが、必ずしも実態を表すことにはなりません。橋梁は案外立体的に複雑な構成をしていますので、独立した構造系が複雑に組み合わさっています。全体構造系の振動を解析する場合には、部分構造系の寄与を最小限に抑えます。その方法は、剛性の寄与とマスを主構造に繰り込むことです。例えば、床版・縦桁・横桁・水平構・対傾構・高欄などは、主構造と協力して曲げ剛性に寄与する作用があると同時に、単独の変形もしますので、これらをひっくるめて動力学モデルに組み込むと、計算量が増えるだけでなく、本来は不必要である部分構成要素の振動性状まで計算してしまいます。したがって、主構造の振動性状を求めるためには、2段階の処理が必要です。まず、変形モードが区別できるような注目点（格点）を何点か決めます。これは集中質点を置く場所と考えます。単純桁橋のように連続体では、適当な間隔で格点を決めます。トラス構造物では、トラスの格点を考えればよさそうですが、すべての格点を考えると数が多すぎますので、注目点は間引いて数を減らします。例えば、ワーレントラスの垂直材が付く格点がそうです。次いで、この格点だけに注目して変位マトリックスを組み立ててから振動方程式を立てて解きます。臨機応変に構造モデルを考えるときは、すべて立体トラスにモデル化するテクニックを使うのが便利です。構造力学では、トラスモデルはあらゆる箇所に陰に陽に応用されています。

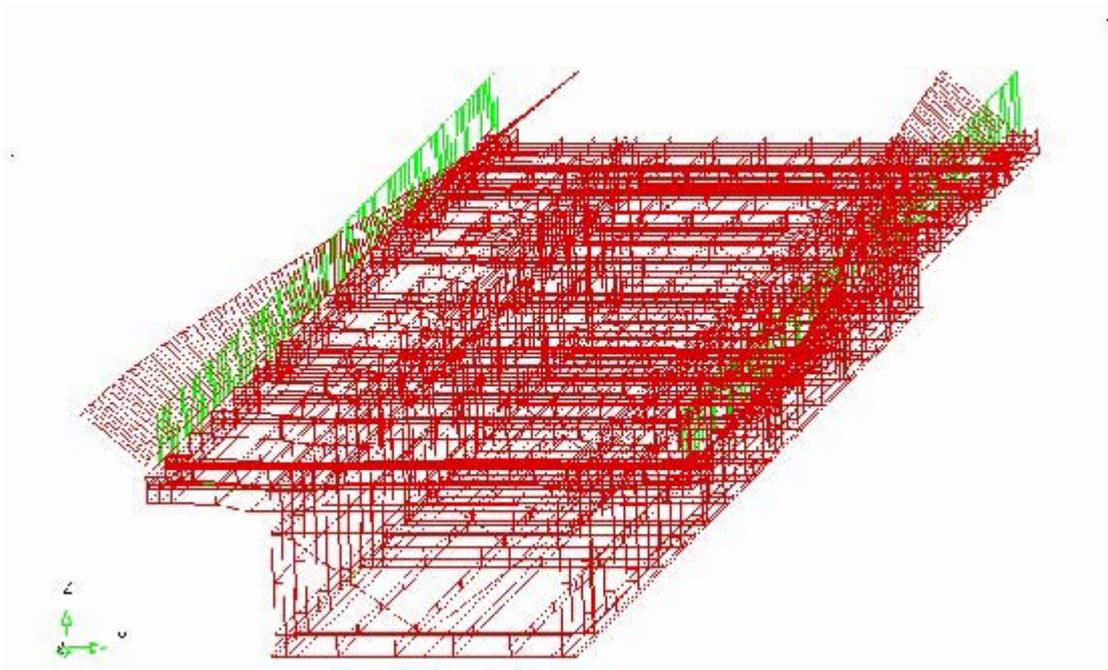


図 7.9 高欄まで精密にモデルに組み込んだら卓越振動が高欄になった失敗例

8. 橋梁振動測定のアークाइブデータ

8.1 構造物振動研究の歴史

特に 1960 年代以降について解説

振動現象の理論的研究と、実際に振動を測定した研究の歴史は、古く 18 世紀後半にまで遡ることができます。日本では戦後の復興が軌道に乗り出した 1960 年代から多く行われるようになりました。構造物の振動測定に関わる研究の問題点は、三つありました。第一は対象とする構造物の在る現地に出かけなければならないこと、第二は、振動測定の装置がかなり嵩張って、持ち運びの機動性が不便であったこと、第三は、測定データの解析に手間が掛かったことです。初期の振動測定には地震計が用いられました。次善の装置として、振動現象を電気信号に変換して記録する方法が開発されました。これらは、100V の商用電源を必要とする装置でしたので、橋梁のように野外構造物の測定では、大きな制約でした。消費電力の小さな小型のテープレコーダが普及し始めた 1980 年代になると、自動車電池で電力がまかなわれるようになって、現場測定の機動性が上がり、かつ簡便になりました。現在、2000 年代は、IC 化によって、電池で利用できる測定装置だけでなく、解析ツールのパソコンも含めて、軽量でポータブルなシステムが実用になってきて、一つのイノベーション(innovation)を迎えています。

大学での研究対象としては制約が大きかったこと

構造物の振動性状の研究は、大学で取り組む対象としてはハンディキャップが大きい面があります。設備だけでなく、測定から解析まで、お金が掛かりますし、測定実行部隊も持ってません。つまり、優雅な理論研究ではないことです。もう一つ「振動測定をした」と言う実務的な事実の報告だけでは学術論文としては評価対象に取り上げてくれないことです。当然、正統な研究費はもらえません。そもそも、工学部は物造りに関係することを研究対象としますので、産学共同は一つの常識です。これが 1960 年代の大学紛争では罪悪視されましたので、さらに肩身の狭い時代を過ごすことになりました。そうは言っても、筆者は橋梁構造物を専門に掲げていましたので、構造物の健康診断に応用できることを売りにし、測定から解析までの全体システムを経済的に組み立てることを研究し、それを提案することを目標としました。構造物の対震性を判断する研究には、一般論ではなく、具体的に対象構造物の振動の性質を知らなければならない、と言う大義名分もあったからです。幸いなことに、1970 年前後は、東名・名神高速道路を始め、全国的に橋梁建設が盛んでしたので、多くの測定機会に恵まれました(表 8.1)。しかし、成果の発表の場が狭かったこともあって、大部分が未発表のレポートして眠ってしまいました。

所見の見直しが必要であること

古い実測データは、**事実**(fact)としての重みがあります。しかし、この事実の解釈には個人の**意見**が入ります。現在の時点(2006)で見直すと、別の解釈ができる場合があります。構造物は、供用年数が長いのですが、やはり老朽化は進みます。同じ橋梁を何年か経って再度測定できれば、比較ができます。これらのデータは、対象構造物がいつ建設され、いつ測定されたかは、再度同じ対象を測定して比較するときの経年変化を知る上で重要な意義を持ちます。筆者と加藤は、複数の東名高速道路橋を、完成直後(1969)と 10 年を経て(1980)二度の測定の機会がありました。その後は測定の機会がありません。対象橋梁が、補強や架け換えがあって以前との比較ができない場合もありますが、再度測定する機会があれば、この間の経年変化が得られると期待しています。ここにまとめたのは、主に加藤雅史氏(現九州東海大学)の学位論文(1984)と、その原稿資料が元になっています。元の資料は、機会を見て電子化しようと思っています。

タイムスパンの長い研究を目指したこと

この章で紹介したようなタイムスパンの長い研究は、データ管理がしっかりとできて、複数年度に渡る長期研究が認められる組織がないと実を結びません。残念ですが、筆者と加藤が名古屋大学を去って、研究を引継ぐ場が無くなり、殆どのデータは全滅してしまいました。しかし、IT 革命(information technology)が社会に根付くようになって、時代は良い方向に進んでいると思います。個人の趣味的な研究であっても、WEB を介して公表できるようになりました。振動測定のアークाइブデータは、一般的な橋梁データベースに組み込むことを計画して提案していますが、実現までには少し時間が掛かりそうです。測定方法とデータ整理法を大衆化して、多くの人が測定したデータを共用できる組織も欲しいところです。

8.2 橋梁上部構の振動実測データと解釈

単純橋は高次の振動が出ない

橋梁の振動は、上部構だけでなく、橋脚・橋台・基礎地盤の総合で判断しなければなりません。最初に、桁の振動の性質から説明します(表 8.1 に橋梁種の別に上下動の振動数を示します)。理論では、単位重量一定、曲げ剛性一定の単純桁の固有振動数は、次数 n の自乗 n^2 に比例します。単純橋では、3 次振動以上は殆ど測定にかかりません。しかし、現実には、基本振動数の 4 倍以下の振動が測定にかかります。この振動数が、実は捩れ振動です。橋梁上の上下動成分には、全体構造系の上下振動だけでなく、捩れ振動を示すことも多く、これが上下振動成分と合わさって測定されます。単純トラス橋のように桁高が高い構造では、捩れ成分が橋軸水平方向にも現われます。さらに、床組の局所的な振動も拾います。ただし、この振動数はかなり高いのですが、全体系の高次数の振動と間違えることがあります。これを避けるには、センサーの設置場所に注意して、主構造系の振動を得るようにすることです。もう一つは、ランニングスペクトルを参考にします。加振を自動車通行で行うと、自動車の通過する時点だけに振動が得られれば、それは局所的な部材単位の振動であることが分かります。振動波形全体をフーリエ解析すると、この区別ができません。以前に測定された振動数のデータを見ると、この分別が曖昧になっている例が少なくありません。

水平動は必ず捩れを伴うこと

平面形状で二方向の対称軸を持つ橋梁は、立体構造ではありますが、上下方向の変形だけを独立に扱うことができます。そのため、構造解析は垂直平面内の力と変形を扱うのが普通であって、立体的な視点に欠けます。橋梁の振動解析もそうです。水平動と捩れの扱いに関しては全く念頭にないか、やや歯切れが悪くなります。橋梁の支承は、橋桁構造系としては最も高さの低い位置にありますので、橋に横方向の変形があれば、橋断面は、支承に対して橋軸直角方向の水平動と回転(捩れ)になります。幅員の広い桁橋では橋全体の桁高が低いのと、床組が水平面内での曲げに対して大きな剛性を持ちますので、水平面内の変形は殆ど起きなくて、捩れ分が上下動成分に含まれて測定にかかります。トラス橋、吊橋、アーチ系橋梁は全体構造形として高さがありますので、支承位置との相対的な高さによって、水平と捩れの連成の度合いが変わります。回転運動だけを選択的に取り出すセンサーはジャイロコンパス応用のような特殊な測定器でないと記録できませんので、捩れに伴う垂直または水平変位が現われる箇所測定にかかります。今までの測定では、捩れ成分を分離して取り上げる意識は殆どありませんでした。この意味で、構造解析では、理論と実際との付き合い合わせの研究課題が多く残されています。

連続橋は近接して三次程度までの振動が得られる

連続橋の振動モードは、径間単位を一波形とするものと、部分的に二波形(径間内で逆対称)の組み合わせを示します。上下動の卓越振動の個数は径間数まで得られることが多く、周期(振動数の逆数)で見ると、三径間連続橋では、近似的に 1:2:3 となります(図 8.1 浜名湖橋)。橋の振動もマクロに見れば波動ですので、連続する橋桁の長さを波形が折り返して移動する性質があるからです。しかし、一径間に複数の波形を含むほど桁の剛性が小さくはありませんので、より高次の振動を示さないのが普通です。この場合にも捩れ振動の成分が入ります。比喩的に言えば、この振動モードは支点到節のあるリボンの捩れのような変形です。これも解析技術上では分離が難しい問題です。幅員の広い桁橋では、上下動と同じモードで、近接してやや高め振動が得られる場合が捩れモードに当たります。

アーチ系の橋梁は上下動成分も複雑に現われる

一般の人は、上弦材がアーチ状に曲線を描く曲弦トラスと、アーチ系構造物(ランガー、ローゼ、タイドアーチ)の区別が分かりませんが、これらは力学的には別系列です。一般的に言えば、トラスは格間に斜材があり、アーチ系では斜材がありません。ニールセンアーチは千鳥状に吊材を使いますので、力学的な性質はトラス構造です。アーチ系の第 1 次固有振動の振動モードは支間中央に節のある逆対称波形になり、トラス系の場合には対称波形が常に第 1 次の固有振動です。トラスは弦材に曲げ剛性が無いと仮定した構造系です。アーチ系構造は、アーチリブまたは補剛桁のどちらか、または両方に曲げ剛性が無いと、この全体系はトラスとして見れば不安定構造物になることに気を付ける必要があります。部材構成にトラス組を使わない支間の大きなアーチ系構造は、全体として華奢に見えます。そのため、パネル間の形状は変形し易く、これが結果として高次数までの振動モードとして測定されます。

表 8.1 1960～1980 間に測定された橋梁上下動振動のまとめ (島田・加藤他)

橋梁種別	橋梁名	架橋場所	主支間	上下動振動数	減衰係数	測定日	備考
鋼桁	両羽橋	酒田市最上川	21.34	5.0	0.1	1968.10.24	1931 架橋
鋼桁	下穂積跨線橋	近畿自動車道吹田市		3.25/7.0		1970.08.11	
連続鋼箱桁	原鶴大橋	福岡県	67.2	1.13	0.01	1959	3 径間:文献より
連続鋼箱桁	城ヶ島大橋	神奈川県	95	1.1/1.8/2.6	0.003	1960	3 径間:文献より
	木津川橋	大阪市	96	1.33	0.046	1970	3 径間:文献より
連続鋼箱桁	浜名湖橋	東名浜名湖	140	0.6/1.0	0.01	1969.01.24	4 径間
				0.6/0.9/4.1		1980.10.23	
連続鋼箱桁	浜名湖橋	東名浜名湖	80	1.2/1.8	0.05	1969.01.24	2 径間
				1.1/1.7		1980.10.23	
連続鋼桁	境大橋	利根川	63.2	2.65			3 径間:文献より
連続鋼桁	新十三大橋	大阪市	90	1.2/1.5			3 径間:文献より
連続鋼合成桁	豊川橋	東名豊川	60	3.0	0.05	1968.12.20	3 径間
連続PC	豊川橋	東名豊川	56	0.36	0.4	1968.12.20	3 径間
連続PC	川音川橋	東名神奈川	90	1.2/2.34	0.03	1969.05.21	デビダグ 2 径間
				1.1/2.25		1980.10.24	上り線
連続PC	岡谷高架橋	中央道長野県	148	0.8/1.2/1.5		1986	デビダグ 5 径間
連続PC	神島大橋	岡山県	86	1.4/3.0		1970	3 径間:文献より
連続PC	真崎大橋	岩手県	70	3.5/5.2		1971	3 径間:文献より
連続PC	木谷川第 2 橋	中央道	79.3	3.3/7.0/11		1972	2 径間:文献より
PC 桁	奈良高架橋	近畿自動車道吹田市		6.3/6.8		1970.08.11	フレシネ 4 主桁
PC 桁	奈良高架橋	近畿自動車道吹田市		6.0/9.0			フレシネ 2 主桁
単純ワーレン	両羽橋	酒田市最上川	66.48	3.0/5.0	0.1	1968.10.24	1931 架橋
単純ワーレン	犬山橋	愛知県犬山市	73.152	2.6		1980?	1925 架橋
単純ワーレン	千鳥橋	名古屋市				1980.07.14	1937 架橋
ポニー	両羽橋	酒田市最上川	33.0	4.8	0.2	1968.10.24	1931 架橋
単純T	東山橋	福井県	70.2	3.2	0.01	1979	文献より
上路連続T	酒匂川橋	東名神奈川	80	1.8/2.5/3.9	0.2	1969.05.21	3 径間 (上り線)
				1.7/2.4/3.9		1980.10.24	
上路連続T	酒匂川橋	東名神奈川	96	1.3/2.0/2.6	0.2	1969.05.21	3 径間 (下り線)
				1.4/2.2/2.8		1980.10.27	
上路連続T	吉野橋	中央道	108	1.8	0.04	1968	3 径間:文献より
上路連続T	底沢橋	中央道	85.4	1.5/2.4/2.6	0.02	1968	3 径間:文献より
上路連続T	鶴川橋	中央道	88.8	1.3/1.7/2.2	0.01	1968	2 径間:文献より
上路連続T	横吹橋	中央道	72	0.9/2.0/4.3	0.01	1968	3 径間:文献より
上路連続T	釜房大橋	宮城県	66.3	1.6/2.1/2.4		1970	3 径間:文献より
ゲルバーT	衣浦大橋	愛知県衣浦港		2.2	0.08	1969.06.06	
上路ランガー	駒沢橋	東名神奈川	90	1.6/2.0	0.02	1969.05.21	
				1.5/2.0		1980.10.24	
上路ランガー	境橋	東名神奈川	90.0	2.5	0.02	1969.05.21	
上路ランガー	二恵橋	群馬県	88	2.1	0.01	1962	文献より
上路ランガー	槇木沢橋	岩手県	140	1.5	0.01	1965	文献より
上路ランガー	御前山第 1 橋	中央道	90	3.0	0.03	1968	文献より
上路ランガー	御前山第 2 橋	中央道	66	3.1	0.03	1968	文献より
上路ランガーT	万世橋	東京都奥多摩	74.2	2.5/4.8/5.5		1974	1957 架橋
下路ランガー	小見川橋	利根川下流	80	2.2/2.9		1974	
上路ローゼ	皆瀬川橋	東名神奈川	180.0	0.47/0.92	0.05	1969.05.21	上り線
				0.47/0.90	0.02	1980.10.24	
上路ローゼ	皆瀬川橋	東名神奈川	162	___/1.1	0.05	1969.05.21	下り線
				0.61/1.2		1980.10.24	
上路ローゼ	落合川橋	中央道岐阜県	166			1975	データ紛失
上路ローゼ	上梨橋	富山県	127	1.2/1.8/2.8	0.01	1976	文献より
下路ローゼ	新瀬戸橋	浜名湖	103.2	2.0/3.0		1968.11.09	パイプローゼ
鋼アーチ	納屋橋	名古屋市	27.4	10.0	0.07	1970.11.20	1913 架橋
鋼アーチ	鈴ヶ滝橋	愛知県猿投	27.4	1.9	0.01	1972	方杖形式
RC 固定アーチ	帝釈橋	中国道広島県	145.0	1.7/2.2/4.	0.01	1978	
斜張橋	勝瀬橋	神奈川県相模湖	128	1.8/2.6/3.6		1960.06.06	
吊橋	瀬戸橋	浜名湖	125.0	0.6/2.0		1968.11.09	
吊橋	気田川橋	天竜市	130.8	1.25/2.5	0.007	1969.10.04	ポニートラス補剛
吊橋	錦橋	天竜川上流	72.6	2.2/4.2	0.007	1969.10.27	ポニートラス補剛

備考: T はトラス、G はガーダーの記号です。



図 8.1 : 東名浜名湖橋 (手前が東京方面)



図 8.1 : 酒匂川橋



図 8.3 : 東名皆瀬川橋 (手前が上り線)



図 8.4 : 中央道落合橋 (向こうが名古屋方面)



図 8.5 : 小見川橋



図 8.6 : 鈴ヶ滝橋



図 8.7 : 万世橋 (東京都奥多摩)



図 8.8 : 下穂積跨線橋

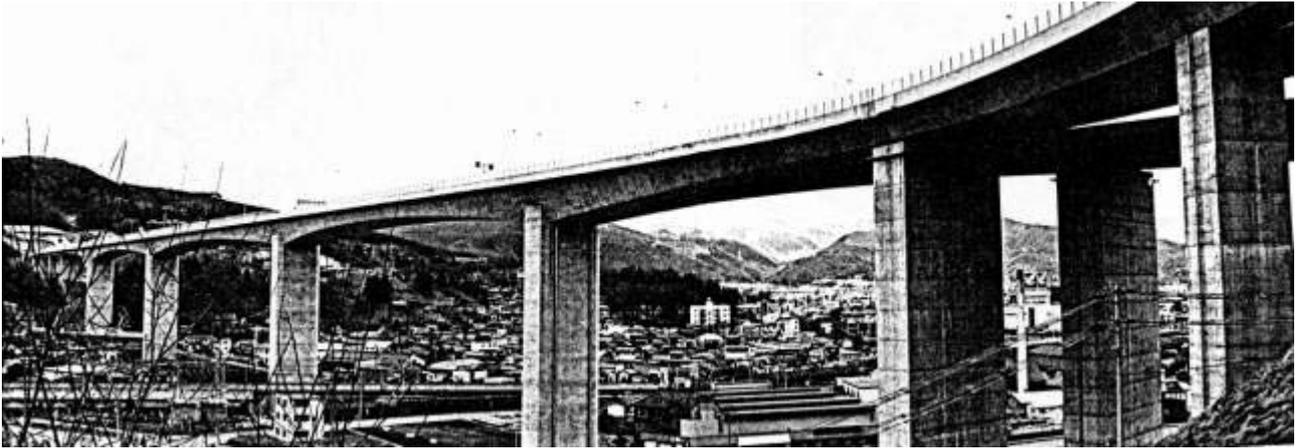


図 8.9 : 岡谷高架橋



図 8.10 : 奈良高架橋



図 8.11 : 勝瀬橋 (神奈川県相模湖、足場は測定作業用)

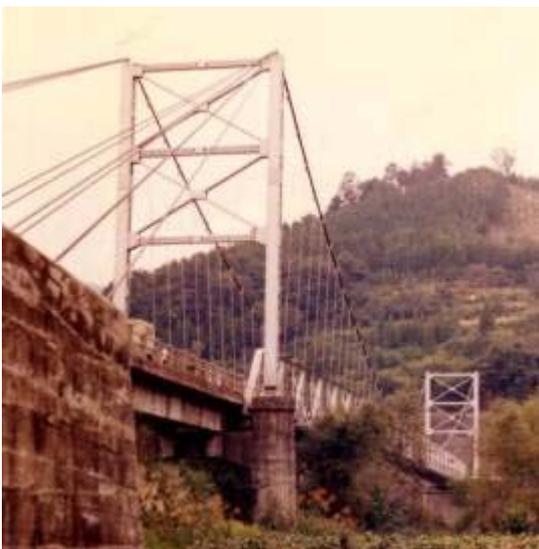


図 8.12 : 気田川橋 (けだがわきょう)

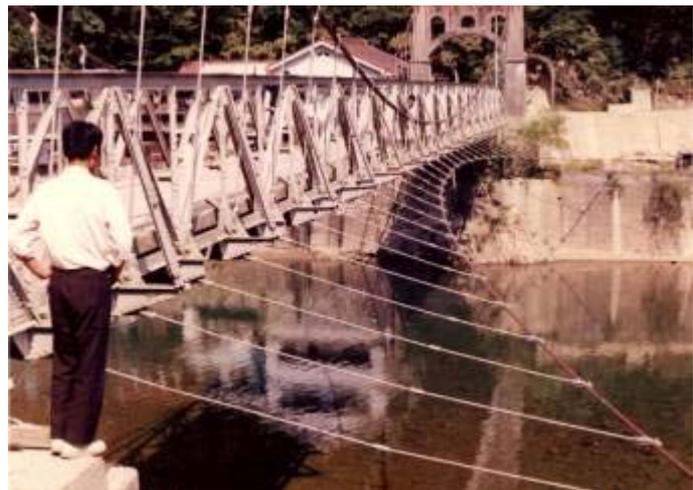


図 8.13 : 錦橋 (おきんばし)

アーチ系橋梁と吊橋は逆対称振動が第一次である

アーチ系橋梁と吊橋とは、どちらも方物線状の部材で桁を補剛する構造形式ですが、自重の殆どをアーチまたはケーブルが持ちます。活荷重が作用することによる変形モデルは、引張軸力が作用する桁として扱うことができます。引張力が小さいと普通の桁としての曲げ変形になり、曲げ剛性が小さいと引張を受けるリボン状の変形になります。固有振動時の変形モードにおいて、第1次の sine 波形は、橋の形状である方物線形と近似しますので、やや特殊な性質になります。長大吊橋では、塔が中央径間側に引きずられる第1次の変形が出てきますが、一般的な振動現象は、支間中央に節の有る逆対称振動が最低次の振動変形モードです。固有振動数の大きさの比率は、次数の大きい方に向かって、桁モデルの場合、4:9:16:25 …の比であり、リボンモデルの場合には 2:3:4:5 …の比になります。実際の橋梁では、単純桁構造とは異なって、多くの固有振動が測定されますが、その振動数比のシリーズは、上記の二つのシリーズの中間で得られます。表 8.1 で見ると、第1次と第2次の振動数比が約 1:2 となるデータが多いことを読取ることができます。

アーチ系構造は橋軸直角方向の水平動が大きく出易いこと

東名高速道路の皆瀬川橋（図 8.3）は、1969 年に完成した上路ローゼ桁です。この振動の現場測定をしていて驚いたことは、全く車両通行が無いにも関わらず、支間中央の路面上で、橋軸直角方向の水平振動（周期約 1 秒）が常時観測されたことです。振動モードは、1 波形の対称 1 次です。この起振は、谷風です。万世橋（図 8.7）は、交通量の増加に対応する補強工事前に、静的・動的測定を行った張りだし部を持つ上路ランガートラスです。アーチ系構造の特徴として橋軸方向の水平動が大きく得られましたが、それにも増して、上下動の非対称 1 次振動 2.5Hz よりも、橋軸直角方向の水平動が 1.6Hz で大きく得られました。現在の時点で考えて見れば、これらの水平振動は振れの合わさった動きですが、測定当時は振れについては思いが及びませんでした。そのため、直感的に、アーチ主桁間隔が狭く、水平曲げの剛性が低いことと、対傾構の剛性が小さいためではないかと判断しました。中央道の落合川橋（図 8.4）は、このことを考慮して、最初の案よりも主構間隔を少し広くした設計になりました。しかし、大きな振れ剛性は、橋断面全体を擬似的に閉じた箱断面にすることで得られます。アーチ系橋梁の主桁構成面にはトラスのような斜材がありませんので、この擬似的な箱断面が構成されません。対傾構を頑丈にして断面形が変化しなくても、全体構造としての振れ剛性には寄与しません。小見川橋（図 8.5）は下路のランガー橋ですので、アーチ頂部が水平に振動しても橋面に影響は大きく現われませんが、一見して華奢であることは分かります。この安定問題がアーチ橋の横倒れ挫屈と言われる問題です。これに対して酒匂川橋（図 8.2）のような連続トラス構造は見掛け以上に振れ剛性が高いので、振れ剛性を必要とする曲線橋に採用するのは良い選択であったのです。アーチ系橋梁を斜橋に構成するのも非常に不利な計画であると言えます。

都市部の高架橋は新しい構造形式であること

自動車専用道路が都市部に建設される時は高架橋に成らざるを得ませんが、この構造形式は橋台を持たず、橋脚も建設上の制限を受けることが多いため、この全体は多くの設計上および施工上の問題をはらむようになりました（図 8.8 下穂積跨線橋、図 8.10 奈良高架橋）。一つは幅員が広いので、床組を兼ねた多主桁並列構造になることです。一般に鋼構造では、主桁の本数が増えると経済設計になりませんので、主桁本数を減らすようにします。そうすると鉄筋コンクリート床版の支間が広くなり、これが結果として床版の耐久性を低下させます。そのため、多くの橋梁では建設後、中間に縦桁の増設工事が行われました。橋脚構造そのものも、一般に華奢になるのは否めず、その結果、橋断面は、橋軸水平方向の変位と振れが大きくなります。通常の供用状態では大きな問題になりませんが、道路沿いでは公害振動の苦情が頻発しました。下穂積跨線橋と奈良高架橋は、この橋種の振動測定の走りです。当時はまだ問題意識が明確ではありませんでしたので、通り一遍の振動測定をしました。結果として、下穂積跨線橋は橋軸直角方向の水平動がかなり顕著に得られましたが、現在の時点で考えると、これは振れ成分を含む成分であることが推定されます。隣接して PC 箱桁橋では、振れ剛性が高い構造であるため、水平動成分が小さく得られています。

PC 連続ラーメン橋は新しい形式であったこと

山間部に高速道路橋を建設する場合、高い橋脚上に桁を架設しなければならない場合があります。支間を長くしたいので、連続桁構造にするのが普通です。このとき、橋脚にある程度の弾性変形を見込んで、支点上は水平変位を拘束する固定支承とします。図 8.2 の酒匂川橋はその一例です。デビダグ式の PC 桁構造は、それまでの RC ラーメン構造とは全く異なる橋脚・桁一体型で大きな径間を渡る形式であって、新しい橋梁の景観美を構成するようになりました。東名高速道路の川音川橋は、外見は 6 径間連続ですが、構造的には独立した T 字型の 2 径間連続ラーメン 3 連で構成されています。岡谷高架橋 (図 8.9) は、橋脚高が高い (約 50m) だけでなく、やや変則的ながら 5 径間連続構造であることが、複雑な動的な挙動を示しました。その特徴は 3 つあります。一つは、橋桁全体が橋軸方向に水平に移動する振動です。これは各径間ごとに中央に節のある変形モードを持ち、最も振動数が低く (0.84Hz) 得られました。二つ目は、通常の連続橋にあるように、5 径間で変位が (+ - + - +) のように出る振動であって、1.2Hz と得られました。通常はこの変位モードが第 1 次です。三つ目は、橋脚が高いこともあって、橋全長を 1 波形とした橋軸水平方向の 1 次振動 (0.98Hz) が測定されたことです。この結果を耐震性とどのように結び付けて考えるかは現在の時点では分かりません。

ケーブル本数の少ない斜張橋は連続橋の性質がある

勝瀬橋 (図 8.11) は、日本最初の斜張橋として 1960 年に、神奈川県相模湖に架けられた日本最初の斜張橋です。この時代は、未だ斜張橋の力学的な特性については良く分からない面がありましたので、東大平井敦教授の研究室が測定の依頼を受けたものです。このときに振動の測定も行われましたが、動的応力のオッシログラフ波形から振動数を読み取る、と言う不便な方法でした。振動の性質は、ケーブルの定着点を仮の支点とする 5 径間連続桁の傾向であることが分かりました。

小支間の吊橋は橋梁工学の教材に手頃である

吊橋と言えば、本四連絡橋のような大支間の吊橋を考えますが、山間部には実用的な中小吊橋が多く架けられています (図 8.12 気田川橋、図 8.13 錦橋)。表現としては適当ではありませんが、村役場で設計して、村の鍛冶屋が手掛けられる程度の身近さがあります。橋梁工学の原理を踏まえない素人の設計施工は少し危険が伴いますが、アーチ系橋梁よりも構造力学的な安全性があります。気田川橋と錦橋は、山間の生活道路に架けられた 1 車線幅の吊橋です。補剛トラスを持ちますので、本格的な吊橋として設計されています。固有振動数の性質でも、第 1 次と第 2 次の振動数の比が 1:2.0, 1:1.9 であって、補剛トラスが良く効いていることが分かりました。錦橋では、大きな重量のトラックが頻繁に通行するようになったある日、たまたま両側から突っ込んだ重量車が橋の中央で睨み合い、吊橋上に交通渋滞が起きました。そうこうしている中に補剛トラスの上弦材が挫屈してパニックになりましたが、通行車両や人命の被害は出ませんでした。補修後は重量制限を守り、互いに道を譲りあうマナーが定着したそうです。応力の性質は教科書通りですが、振動のデータは類似橋梁の参考になると思います。

長い歩道橋は捩れ振動に注意する

一般道路の自動車交通量が多くなると共に、歩道を持たない幅員の狭い道路橋では、本橋と並列に歩道専用の橋が多く架けられました。群集活荷重が自動車荷重に比べて小さいので、大きな支間の桁としての応力度は小さくなく、結果的に剛性不足で大きな振動を起こすことで苦情が出ました。しかし曲げ構成はそこそこであっても、幅員が狭いために捩れの剛度が低くなり勝ちです。実用と景観を兼ねた歩道専用橋の計画も少なくありませんが、捩れに対する振動には注意が必要です。最近の例ではロンドンの Millennium Bridge がそうです。筆者は、1986 年、東京都青梅市内の歩道橋について、工場での仮組立の時点で捩り剛性に問題があることを実測で証明して、補強の提案を行ったことがあります。その歩道橋は、支間 71.5m に対して主桁間隔が 2.3m しかなく、桁端部で桁高も絞り込んでありました。歩道橋ですので、橋の縦断勾配が大きく、橋の中央での高さが高い構造でした。この橋の最低振動数は橋軸水平方向の水平動 (0.93Hz) であって、捩れとの連成です。これは垂直面内の振動数 (1.35Hz) よりも低く出ました。捩り振動単独は 2.65Hz と 3 番目に顔を出しました。水平動と捩りの振動の性質は主に主桁端部の捩れ剛性不足から発生するロッキングです。このため、実際の架設では、図 8.13 錦橋に見るような対風ケーブル (storm cable) を敷設するよう提案しました。なお、Millennium Bridge の場合は遊動円木のような動きですが、どちらにしても捩り剛性の不足からくる振動です。

8.3 地盤の振動実測データと解釈

地盤や岩盤を音が駆け巡ること

構造物の基礎は、なるべく良好な地盤や岩盤を確かめて、その上に構築されますので、橋梁の橋脚や橋台上では地盤や岩盤から伝わる常時微動が測定されます。地面の下深くは静かだと思いは間違いであって、振動レベルは低いものの、ランダムな振動に満ち溢れています。その正体は縦波（疎密波）、つまり音です。場所にもよりますが、20～30Hz 付近に卓越振動があります。音としては種々の周波数成分を持ちますので、明瞭な音の周波数とは違って、雑音の塊が波動として通過する周期が擬似的にこの振動で現われ、これと共振する媒体があれば音として強調されます。地震は、かなり遠くに震源があっても揺れを感じるように、音としての縦波は、どこからともなく伝わってきます。動物が地震を予知するという現象は、人間の感覚では感知できない異常音を感じる能力があるからと考えることができます。社会生活の場では、これらの音は、自動車交通などに遠因があります。山ウサギなどは、後ろ足で地面を叩いて局地的な通信手段に使っていますので、地盤振動は動物のレベルでは身近な現象だと思えます。橋梁の橋脚や橋台は、その上を通行する車両の起こす振動を地盤や岩盤に放射すると同時に、下から伝わる振動を受信します。このとき、局地的な地盤や岩盤の弾性的な性質を受けて、場所ごとに卓越振動が現われます。また同時に、橋脚や橋台本体の振動の性質が現われます。研究の目的は、これら振動の総合的な性質から、地盤を含めた構造物全体の健康診断ができるのではないかと、言う点にあります。

音としての速度があってエコーもあること

地盤や岩盤を伝わる振動は、波動としての速度があります。地震時に注目されるP波とS波は縦波と横波であって速度が違いますが、どちらも空中を伝わる音速よりもやや早く、400m/sec～600m/sec が得られています。以前、砂利採取現場で発破をかけたときの振動を数百m離れた箇所まで測定したことがありますが、音の方は振動よりも遅れて聞こえました。また、最近では殆ど有りませんが、ジーゼルハンマーを使った杭打ちも公害振動としての苦情があり、この振動の場合も音は遅れて到着します。一方、コンクリートでは約 3500m/sec、鋼材では約 5000m/sec と縦波の波動速度は一桁上です。橋脚や橋台の下部は弾性的な不連続があり、その箇所での反射、つまりエコーも測定にかかります。山彦は音のエコーであって、音の周波数とエコーの折り返す周期（周波数の逆数）とは、耳で聴けば区別ができます。しかし、これを振動現象として物理的な解析にかけると、この区別ができなくなります。地盤や岩盤の振動を解析するときの解釈が難しい理由の一つがここにあります。軟弱な沖積層の地盤では、やや硬い岩盤との境界が、やはり弾性的な境界を構成すると想像されます。軟弱な地盤での卓越振動が約 10Hz であれば、その深さ方向の厚みが 40m 前後であると推定できます。このような予見を元にして、橋脚や橋台上での振動測定結果を見ると、幾つかの興味のある事実が見られます。その例を以下で解説します。

平野と山地とはかなりの差があること

橋梁は人の社会活動と関わりますので、山奥に大きな橋が建設されることはありませんでした。しかし、東名・名神を始め、各地に高速道路が建設されるようになって、平野部だけでなく山地にも大規模な工事が行われるようになりました。橋梁の上部構の振動性状と共に、基礎地盤の振動も積極的に測定しましたが、地山の箇所と沖積平野部とはかなり性質の差があります。山間部の橋梁としては、東名高速道路の駒沢橋、皆瀬川橋では 3.7～4.0Hz の常時微動が卓越していました。この大きさは軟弱地盤並の低さですが、周辺環境からは考えられない値です。これは、路盤造成区間の横幅として約 100m を考えると説明できます。川音川橋は基礎を含めて約 37m の橋脚に支えられたデビダグ式の PC 橋ですが、橋脚上で 6.1Hz の上下動が得られています。これはコンクリート橋脚の高さ方向を往復する縦波のエコーとすると少し低過ぎますので、深い箇所の岩盤からのエコーを含むと判断しました。一方、軟弱地盤の箇所の例としては浜名湖橋（図 8.1）があります。名古屋寄りでは 0.2Hz、東京寄りでは 0.4～0.5Hz が解析されました。これは典型的な地盤の長周期現象であって、1000m～2000m 単位での地盤長さで折り返すエコーと判断できます。小見川橋（図 8.5）は利根川の下流に架設された橋です。この箇所の沖積層の厚みが大いなので、橋脚・橋台は、言わば沖積層の中間に浮いたような状態になっています。橋脚上の上下振動は、4.8Hz と 13.3Hz に卓越した振動が得られました。同時に約 0.3Hz の長周期振動も得られました。これは、軟弱地盤の深さと幅との推定に使いました。なお、小見川橋は単純下路ランガー桁であって、それぞれが独立した橋ですが、かなり離れた箇所の自動車走行でも振動を拾いましたので、沖積層が厚いことが感覚的に理解できました。これらの長周期のデータは、速度型の記録計を使い、相関解析を経てパワースペクトルを求め、全体として低い振動数の山が得られたことから求めたものです。

8.4 橋脚、橋台の振動実測データと解釈

まな板の上の豆腐モデルとロッキングモデル

我々が住む居住空間の大部分である沖積地は、井戸を掘れば直ぐに水が得られるような水気の多い軟らかな地盤です。これがやや硬い岩盤に乗っているようなモデルを考えます。比喩的に言えば、「まな板の上の豆腐」、現代風に言えば「皿の上のプリン」のような構造です。構造物は、豆腐の上に半ば浮いているか、それとも、橋脚や橋台を支える杭基礎が岩盤まで達して、回りが柔らかい層で囲まれているような状態です。橋脚や橋台が硬い岩盤で固定されていると仮定できるときは、高さ方向に片持ち梁の性質があり、弾性的な振るまいが見られます。しかし、中小の橋梁では剛なマス構造ですので、水平方向に変位が測定されるのは、深部に何かの問題を抱えているとみなします。軟弱な地盤の箇所にある橋梁では、橋脚や橋台の対荷力の判定が必要になることがあります。直接に測定する手立てはありませんので、振動を測って見れば、何か分かるのではないかと、という測定が幾つか行われました。この場合、ボーリングなどで別の測定をしなければ、断定的な結論が得られません。

地盤と馴染む基礎構造が最適であること

橋脚や橋台が軟弱な地層の中間に浮いている場合、年月と共にそれらの下部の圧密沈下が起こり、桁の嵩上げが必要になることがあります。そうかと言って、橋脚や橋台を支える杭基礎を深い岩盤にまで達するようにすると、今度は周辺の地盤だけが下がって段差ができることも起こります。軟弱地盤の箇所との付き合い方は難しいところがあります。しかし、岩盤までの深さが浅い、または露出している箇所が望ましいとは言っても、耐震設計に条件が良いとは必ずしも言えません。それは、直下型の衝撃的な地震時の加速度に対してクッション作用をする柔らかい地層がないからです。免振は、上下方向の振動を考えないアイデアです。この見方で見るとき、伝統的な日本家屋の基礎の造成方法は、合理的な面を持っていて、対象地盤に馴染ませる硬軟の基礎構造を組み合わせます。近代的な構造物は軟弱な地盤を敵視し過ぎるところがあって、地盤に馴染ませて構造物全体を計画する視点に欠けます。橋脚・橋台上で振動を測定するとき、周辺の地盤と異質の性質を示すのは、それらが硬い岩盤との接点にある場合が多いような感触を得ています。

犬山橋と千鳥橋の例

愛知県と岐阜県を結ぶ犬山橋（支間 73.152m）は、1925年に架けられた曲弦ワーレントラスであって、名古屋鉄道と道路との併用橋という非常に特殊な利用がされていました。電車車両は KS12 相当ですので、自重で 45 トン程度あり、トラックなどの重量車よりも厳しい荷重です。二つある橋脚の振動には明らかに差があり、一つは横方向の振動が大きく、電車の運転士にも体感があるほどでした。この橋の基礎は岩盤に直接支持されていますが、橋脚本体の弾性的な振動ではなく、ロッキング振動と考えられました。しかし、この復元力がどのようなメカニズムで実現されているかは分かりませんでした。一方千鳥橋は名古屋港の軟弱地盤の箇所に 1937年に架設された3連の曲弦ワーレントラスでした。交通量の増加に対処するために架け替えが計画され、その調査として橋脚と橋台の耐荷力の判断が必要でした。橋台は松杭が使用されていることもあって変位が生じていましたが、橋脚はかなり強固な井筒基礎で施工されていますが、根入れ深さは不明、周囲は厚いヘドロで囲まれた構造です。したがって表面に見える橋脚高さよりも実質的にかなり高さを持った構造になっているらしく、橋脚上端での橋軸直角方向の水平振動（1.9～2.3Hz）も大きく、また減衰係数も低く得られました。上下動については、トラス橋本体の振動数が 3.7Hz であるのに対して、橋脚上では 3Hz と低く得られました。地盤の特性を調べるためには、橋梁上部工の振動測定とは別の特性を持つセンサーが必要であると思います。その理由は、地盤は人工物ではありませんし、場所によって性質が変わるからです。

9. 最近行った振動解析__板桁の例

9.1 データの保存と再利用

パソコンと周辺装置の進歩が大きいこと

筆者がこの連載記事を計画した時点は、この 9 章の原稿を出稿する時点のおよそ一年前(2005)です。原稿は既に完成していましたが、改めて見直すと、この一年の間に得られた多くの知見を加えるべきであると思い、原稿を大幅に書き直しました。この章で利用した振動データは、大量記録装置である CD-ROM に書き込まれていますので、何度でも読み出して解析に利用できる便利さがあります。最近では、小さな寸法のフラッシュメモリで大容量のデータを簡単に読み書きできるようにもなりましたので、解析作業は CD-ROM から抜粋したデータをメモリに取り込んで利用しています。パソコン本体だけでなく、メモリなどに関連する周辺装置の進歩の速度が速く、一年前の常識も変わってしまいました。橋梁の振動データは、アーカイブデータとして長期の保存に耐える保守的な考慮が必要ですので、データ扱いの便利さとのバランスをどのように調整するかが新しい問題となってきました。振動データは、機会があれば、とにかく測定し、データを保存しておけば、解析は後で行えます。理想はそうですが、具体的かつ実用的なハード及びソフトの総合システムに育てるには、これからも多くの開発研究が必要です。この問題は、既に第 1.4 節で簡単に触れたデータストリームとデータマイニングに絡みます。

解析例に使った元データの概要

振動測定は何を求めるように計画するのか、また、測定したら何が分かるか、を説明するためには、具体的な実測データを使ってソフトウェア解析の過程を説明するのが最善です。幸いなことに、橋梁・地盤・建物の三者を同時に計測した大量データを研究用サンプルとして利用する許しを得ましたので、その中から解析サンプルを選びました。対象データは 2002 年度に測定されたものであって、国道 23 号線の共和高架橋本体、その近傍の家屋と地盤です。管理者側の国交省の了解を得て、実測に当たったオリエンタルコンサルタンツが保存してあるデータの提供を受けました。データ量は膨大ですが、その一部を抜き出して、プログラム TimeProcess (第 6 章で紹介)で処理するように部分的に加工して使いました。これは手作業でのデータマイニングです。共和高架橋は、前第 8 章の図 8.8 の写真とほぼ同時期に同形式で架設された典型的な都市高架橋です。ただし、上下線が繋がって幅員が二倍広い 3 径間鋼連続橋です。幅員と径間が共に約 22m の平面形状をしています (図 9.1)。橋梁の加振方法は、25tf のダンブカーが橋梁上を時速 70km で単独通過走行させた約 10 秒の記録を選びました。データサンプリング間隔は 1/200 秒、サンプリング数は 2048 です。



図 9.1 共和高架橋の主桁と床組みを示した写真

振動データの事前加工

多くの測定注目箇所がありますが、TimeProcess の解析ソフトは、同時 3 事象までをまとめて解析するように標準化してありますので、橋梁・家屋・地盤別に、同時刻の 3 事象を選びました。全体の波形は図 2A, 2B, 2C を並べて観察して下さい。橋梁の場合（図 2A）は、中央径間の中央で幅員方向に 3 箇所設置した上下動の加速度データ ($Z1, Z2, Z3$) から、次のように加工した 3 事象です。

- (1) 3 測定値の平均値 $(Z1+Z2+Z3)/3$
- (2) 振れ成分を引き出すようにした $(Z1-Z3)$
- (3) 幅員方向の変形分 $(-Z1+2\times Z2-Z3)$

家屋振動（図 2B）は、橋梁に面した鉄骨 2 階建ての事務所兼住居の 2 階で、橋軸方向水平動・橋軸直角方向水平動・上下動の 3 成分です。地盤振動（図 2C）は家屋の場合と同じく橋軸方向水平動・橋軸直角方向水平動・上下動の 3 成分です。

振動波形データの見方

振動測定の生の波形は、後の解析結果を判断するときに重要な情報を与えてくれます。振動測定データの作業場所は橋梁の下面ですので、走行車両の位置を眼でみて確認できません。そのため、車両が測定箇所に進入して去るまでが想像できる時間区間を、波形データからサンプルしたものです。ダンブカーの前輪と後輪が橋脚上を通過するときの、大小対になった衝撃振動が地盤振動では良く現われています。地盤振動を解析すると、走行車が橋脚上を通過する周期が約 3 秒であることが、相関関数の波形では「うなり」のような形状で現われていることが、後になって気が付きました（図 4C を見て下さい）。

9.2 ノイズの除去方法

加速度データを速度または変位データに積分する

振動測定をすると、音に近い高周波成分をノイズとして拾い、これが実際に求めたい信号を取り出すときの障害になります。電気電子工学ではこれを SN 比 (signal/noise) と言い、ノイズを相対的に減らすための対策が種々工夫されています。構造物の振動測定の場合、測定箇所に注意を払うこと、サーボ機構を組み込んだセンサを使うこと、アンプ側にもフィルタを介すること、などの対策が工夫されてきました。速度型のセンサは、より望ましいのですが、やや扱いが不便です。加速度型のセンサは簡便ですが、周波数の高い方で感度が上がります。そこで、加速度型のセンサ出力をローパスフィルタや電子的な積分回路を通して記録する、などの工夫が試みられてきました。測定器側に凝った装置を工夫するよりも、なるべく単純で安価な加速度計を使い、ソフトウェアでノイズを除去する方が弾力的に対応することができます。その一つの方法は、デジタル化した加速度データを数値積分して、速度データ、さらには変位データに直してからスペクトル解析に載せることです。図 3A は橋梁の加速度波形を積分して速度波形に直したもの、図 3B は、これをさらに積分して変位波形を求めた例です。変位波形は、移動荷重によって連続梁としての変形が、径間を通過することに応じて＋＋のように変化することが読み取れます。なお、数値積分をしてデータ変換をするソフトウェアは、DataIntegral として準備してあります。

自己相関関数をまず計算する

元の振動波形を、そのまま直ぐにスペクトル解析に載せると、ノイズに相当する高調波成分まで計算してしまい、スペクトル図形が見難くなります。構造物の振動現象は、攪乱力に引きずられて種々の周期成分がスペクトルに現われますので、スペクトル波形全体は統計的な意味での確率分布の性格を持っています。これは、或る固有振動が出たり出なかったりする性質を意味しますので、個別のピーク値を神経質に考えるのではなく、ある幅を持った包絡線図形として判断する必要があります。有意なデータを図形上で明確に区別できるようにするには、大きく分けて二つの対策があります。一つはスペクトル図形の尺度を、比例尺度で表す、または対数尺度で表す、などのように選択できるようにしておいて、見易い方を選ぶことです。もう一つは、第 7 章で説明したように、再帰的に自己相関関数を計算して、ランダムな性質を除き、周期的な性質を強調してからスペクトル解析に載せる方法です。後者の方法が実践的です。

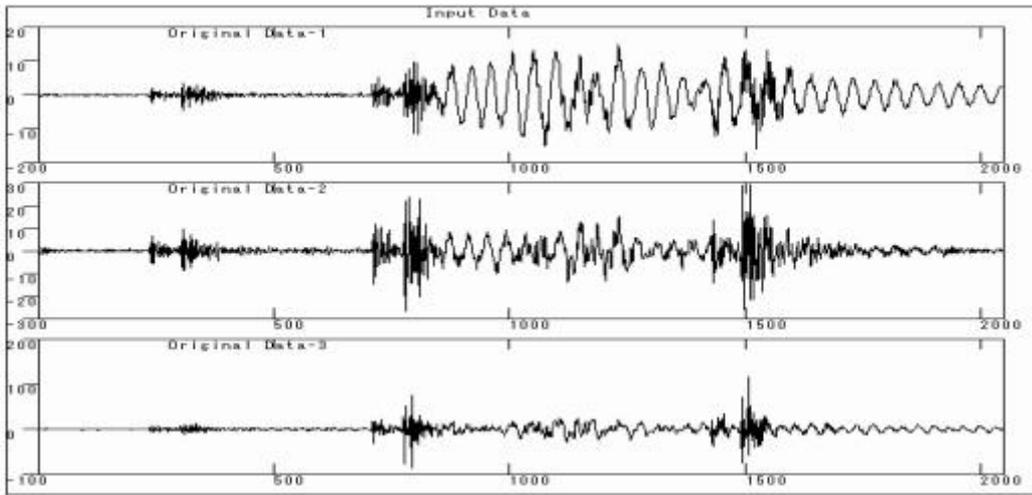


図-8. 2A 橋梁床上幅員方向の3箇所で測定した上下動から、単純に算術演算で合成した波形（上から、単純平均、左右逆対象成分、幅員方向の変形を引き出した成分）

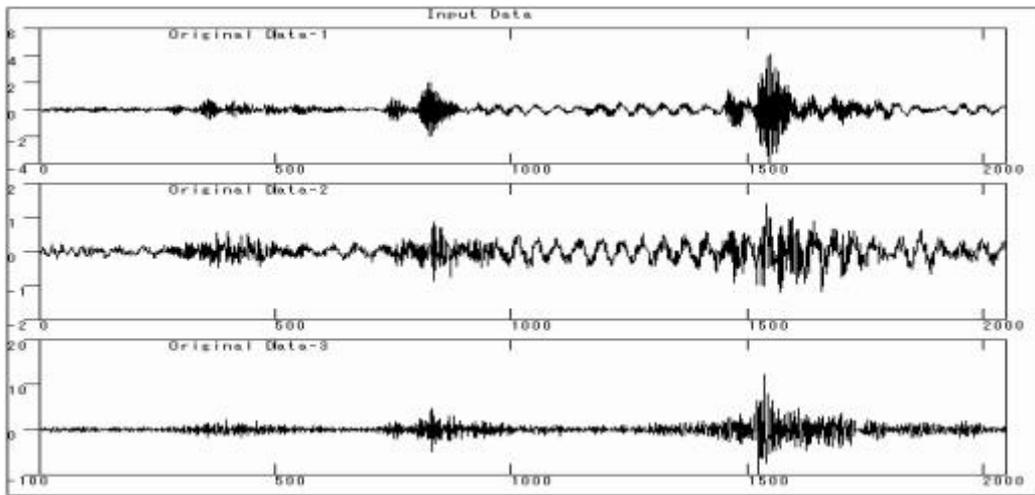


図 8. 2B 家屋2階での振動（上から橋軸直角方向水平動、橋軸方向水平動、上下動）

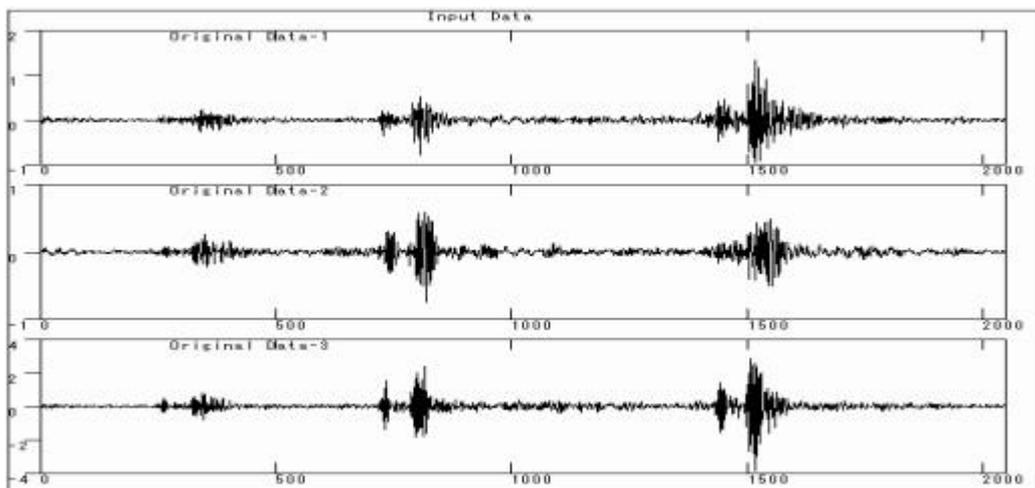


図 8. 2C 家屋前の地盤振動の波形（上から橋軸直角方向水平動、橋軸方向水平動、上下動）

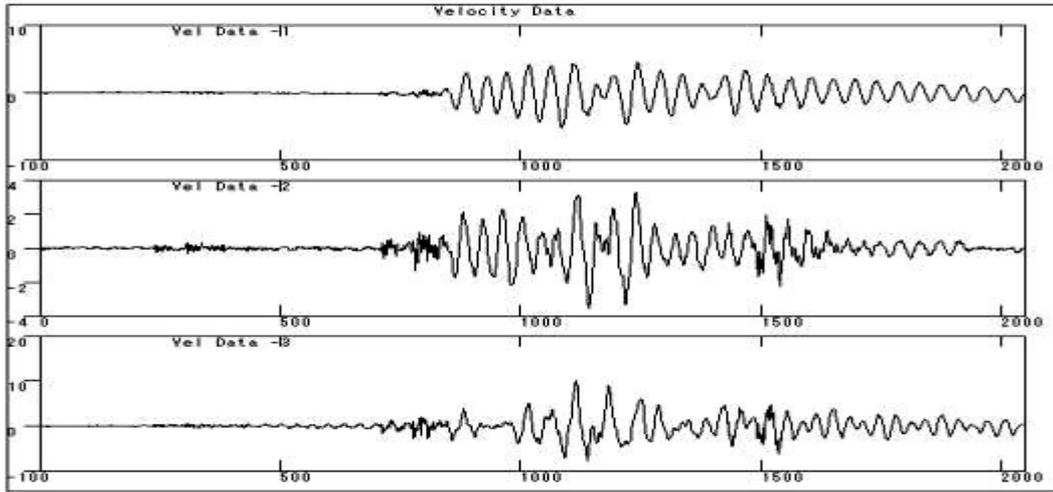


図 8.3A 加速度波形を一回の数値積分をして速度波形にした例（元のデータは図 1A です）

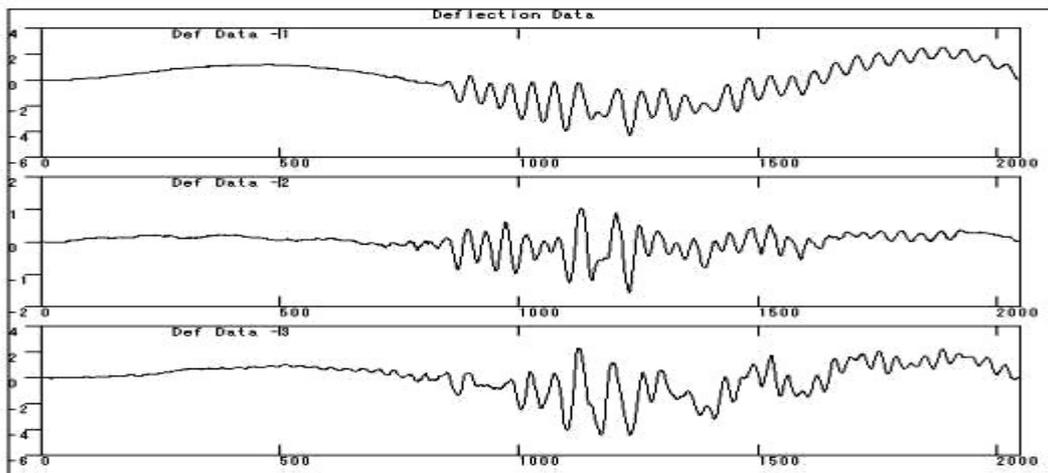


図 8.3B 速度波形をもう一回積分して変位波形を求めた例です。

9.3 相関関数の計算とその解釈

橋梁部の相関関数グラフが示す性質

図 4A, 4B, 4C は、それぞれ 3 成分波形データ間の相関グラフを示したものです。例図は、再帰的に二度の相関係数を計算したものを示しました。対角線位置が自己相関関数、対角線位置を挿んで対称位置にある二つは相互相関関数であって、一方のグラフの向きを変えれば連続する性質があります。自己相関関数は、時間差 0 の位置で対称ですので、半波形で判断できます。まず注目するのは、自己相関関数のグラフであって、この半波形は、振動系が単位の衝撃を受けたときの応答を示します。振動系が一質点一自由度の振動系にモデル化できるときは、綺麗な減衰波形を示します。複数の自由度を持つ場合には自己相関関数の波形が乱れますので、複数の卓越振動数を持つことが予測できます。橋梁の場合、第一成分は上下振動、第二成分は捩れ振動であって、どちらも比較的綺麗な減衰波形を示します。正確な振動数はスペクトル計算で求まるのですが、前者は 4.4Hz、後者は 5.1Hz と明らかに別事象です。重要な性質は、相互相関関数のグラフが示しています。というのは、第一成分と第二成分間の相互相関値が小さいことです。第 3 成分は、床版の橋軸直角方向の曲げ変形分を強調するように加工した波形データですが、これには幾つかの振動成分が含まれていることが自己相関関数のグラフから想像できます。しかし、第二成分、すなわち、捩れ変形との相関は殆どありません。第一成分、すなわち、上下振動とは強い相関を示していますので、床版は同時に幅員方向の曲げを伴うことを示唆しています。

家屋は方向別に独立した振動を示す

測定対象となった家屋は鉄骨 2 階建ての、平面図形ではかなり対称性のある構造ですので、3 方向それぞれ独立した振動の性質を示しています。それは相互相関関数がどれも小さく計算されることから判ります。特に注目することは、第二成分の振動が 3.5Hz と際立って低いことであって、これが居住者にとって大きな不快感をもたらしています。しかし、この振動数は家屋自体の固有振動数であって、橋梁の方の固有振動数と近いのですが同じではありません。この意味は、橋梁の固有振動数に引きずられて家屋が強制振動をしているのではなく、橋梁の振動が空気振動を介して家屋に攪乱力を及ぼしていることとなります。振動数が近接していることと、家屋の振動の減衰係数が低いことと重なって、家屋が想像以上に大きな振幅で自由振動をしていることを示しています。地盤を介して家屋を振動させるとは考え難いのは、地盤の振動成分に 4Hz 前後の低い振動数成分が見当たらないことが一つの根拠です。

地盤の卓越振動数は上下動と水平動とで異なる

地震動には P 波と S 波の区別が知られていて、P 波は縦波、S 波は横波です。地盤の振動においては、上下動の成分は縦波の性質が強く、水平動は部分的に横波の性質を示します。橋梁構造物の近傍では、橋脚または橋台を介して橋梁上を走行する自動車荷重による励振を受けます。その模様は、図 2 に良く現われています。自動車が橋脚直上を通過するときに大きな衝撃振動が得られていて、前輪・後輪の順に衝撃が見て取れます。この振動は橋脚を介して上下動として地盤に伝えられるのですが、地表では水平方向の振動に変わって測定にかかります。次節でスペクトルの説明を補いますが、上下動と水平動は明らかに卓越振動数が異なって得られました。地表で測った水平動の振動数が、向きによらずほぼ一定値で、かなり周期性が顕著であること理由は、高架橋の橋脚の剛性が比較的低いからではないかと推定できます。つまり、橋脚の柱の上に橋梁本体が載っていますので、橋脚は一種の倒立振子のような構造系になっているとする仮説です。

相対的に長周期成分が観察されること

振動学の参考書では、振動数が近接した二つの振動の合成では、その振動数の差に当たる低い振動現象が現われることを教えています。この現象は、電気振動や機械振動では体験的にも知られています。しかし、構造物のように攪乱力の応答で振動する場合には、別の原因で見かけ上の低周波現象が得られることがあります。これは、第 7 章で説明したように、或る塊の事象が時間的に周期性を持って現われる場合です。山彦のようなエコー現象は物理的な要因で起こりますが、他の要因でも見かけ上の周期性が得られることがあります。地盤の振動から求めた図 4C 第 2 成分の自己相関関数のグラフは、或る振動現象が時間的に強さを変えて現われる「うなり」ような性質に見えます。これは、荷重車が橋脚を通過する時間間隔が、見かけ上の周期となって現われたと解釈しました。しかし、この周期はスペクトル解析では出てきません。上下動は、もう少し短い周期成分が認められますが、これは垂直方向の縦波が硬い地盤で反射して返ってくるエコーではないかと推定しました。

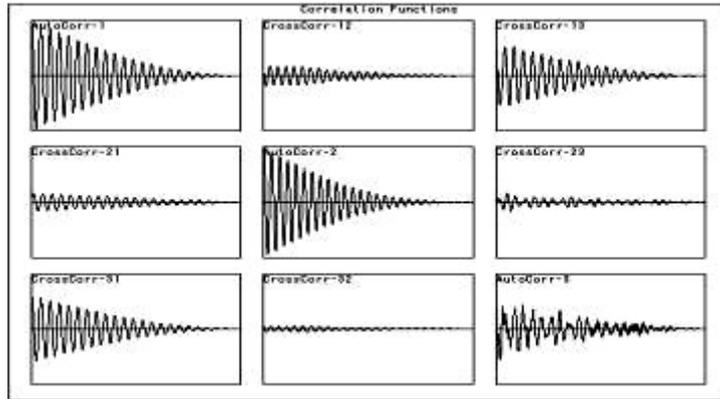


図 8. 4A 橋梁振動三成分間の相関関数の波形（対角線位置が自己相関関数）

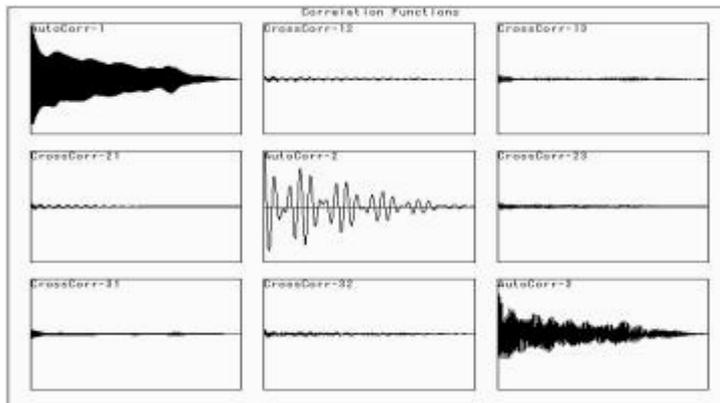


図 8. 4B 家屋振動三成分間の相関関数の波形

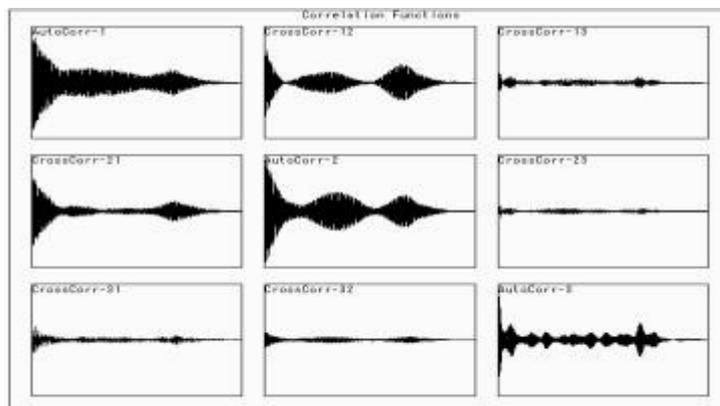


図 8. 4C 地盤振動三成分間の相関関数の波形

9.4 スペクトル計算とその解釈

スペクトルは相関関数から計算する

振動現象に含まれている幾つかの卓越振動数を求めるためにフーリエ解析が応用されます。ここでの解析は、自己相関関数を先に求め、必要に応じて再帰的に自己相関関数を計算してノイズ分を除いてから、その cosine 変換でパワースペクトルを求めます。このグラフの座標軸は、線形尺度と対数尺度が選択できるようにしました。図 5A, 5B, 5C は線形尺度での表示です。ピーク値が鮮明にグラフ化される特徴があります。グラフでは近接した卓越周波数の区別が良く分かりませんので、数値化したデータを表 1A, 1B, 1C に示します。構造物のスペクトルグラフは、橋梁上を通行する荷重車が攪乱力を与え、その応答で振動が起きる確率分布の性格がありますので、卓越振動数の数値は二桁の精度で抑えました。なお、元の波形から FFT を応用して直接スペクトルを計算しますと、もっと細かな周期成分を読取ることができますが、図 5A, 5B, 5C と比較すれば、どれが有効な成分であるかを判断することができます。なお、先に指摘した地盤振動の「うなり」現象はスペクトル計算では消えて見つかりません。つまり、これは振動現象ではないことが分かりました。

表 8.1A 橋梁部の卓越振動

振動成分	卓越振動数(Hz)
上下動	4.4
振れ	5.1
幅員方向の曲げ	4.4, 27

表 8.1B 家屋 2 階での卓越振動

振動成分	卓越振動数(Hz)
橋軸方向水平動	40
橋軸直角方向水平動	3.5
上下動	25

表 8.1C 地盤の卓越振動

振動成分	卓越振動数(Hz)
橋軸直角方向水平動	27
橋軸方向水平動	28
上下動	40~43

橋梁部振動の特徴は振れ振動にある

橋梁は道路面を確保するために或る幅を持つ立体的な構造物ですが、力学的には幅方向を無視した二次元の構造解析が設計計算では実用されています。この理由は、幅方向の変形を床版または横桁の局部的な問題として扱うことが実用として定着していることにあります。また、橋梁全体を立体構造物として解析するとしても、その正しさを実際構造物で検証する具体的な方法がありませんでした。立体構造物として解析する問題は大きく分けると二つあります。一つは、幅員に対して相対的に支間が長くなると振れ剛性の大きい桁構成が必要であること、二つは幅員が広く、全体として幅の広い板のような構造になる場合です。後者は都市部の幅員の広い橋梁に多く現われ、その実用計算法が格子計算と版計算です。いずれにしても、橋梁全体の振れを考える必要があるのですが、その実体は良く分かりませんでした。解析例題に取り上げた共和高架橋は、振れの問題と版の変形問題の二つを浮彫りにした測定になりました。共和高架橋は、幅員が広いのですが、両耳桁部に防音壁が追加工事されましたので、実質的には幅の広い二主桁橋の性質を示します。上下動 4.4Hz、振れ振動 5.1Hz と近接して測定されましたが、動力学的には独立した振動モードです。上下動は、幅員方向の中央で大きな変形を持つ全体変形を起こしています。コンクリートスラブ自体の局部的な曲げ振動は 27Hz がそうであると推定しました。

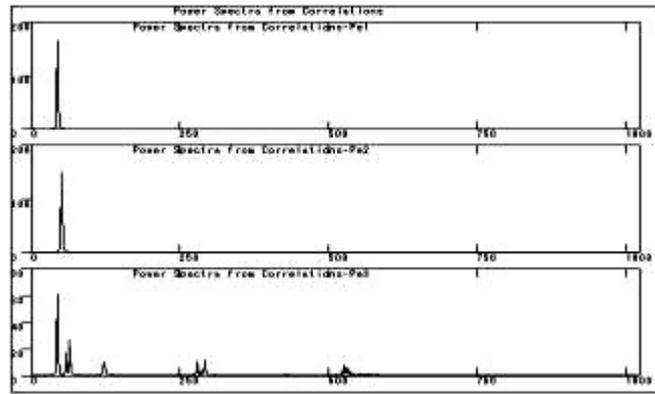


図 8. 5A 橋梁部振動のパワースペクトル (比例尺度で図化したもの)

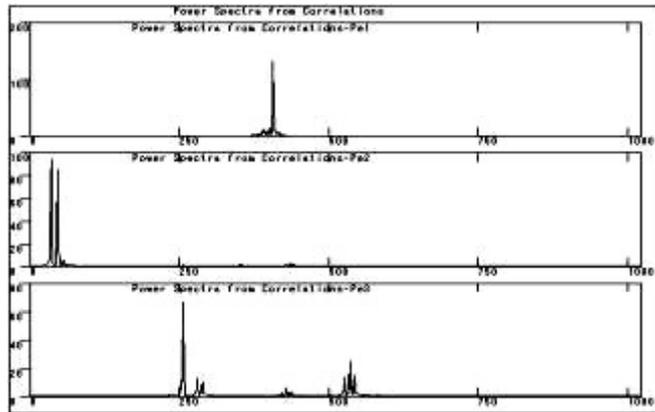


図 8. 5B 家屋振動のパワースペクトル

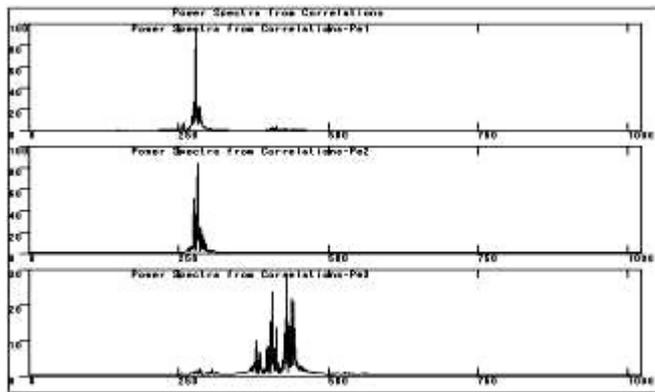


図 8. 5C 地盤振動のパワースペクトル

地盤振動は橋脚から伝えられる

図 8.5 のスペクトル図は、地盤振動の特徴から先に説明します。地盤の振動は、レベルの小さな常時微動がありますが、図 8.2C に見るように、荷重車の走行による衝撃振動を示します。それも、橋脚上を通過するとき際立って大きく得られていますので、橋脚を介して地盤を加振していることが分かります。この卓越振動は、橋梁上部構造のそれとは全く別であることも分かります。しかし水平動成分は向きによって少し振動数に差がありますが、ほぼ同じ傾向と見て良く、上下動とは明らかに別の性質です。一つの仮説は、橋脚がその基礎構造と上部構造とを含めた倒立振子的な力学系を構成していると考えられることです。そうであるならば、この振動の性質は、高架橋の耐震性能の検討に応用するデータとして意義を持ちます。

家屋の振動は橋梁と地盤の両方から加振を受ける

家屋は、それ自体が固有の振動性状を持っています。家屋は、動力学的には複雑な構造ですので、数学的に美しい力学モデルを仮定できませんが、確率的には、そこそこの力学モデルを考えることができます。それを表したのが、図 8.5B のスペクトル図です。そこで得られる卓越振動は、二方向の水平動と上下動は互いに独立です。また、橋梁と地盤の卓越振動数とは近接してはいますが、同じではないことに注目する必要があります。つまり、橋梁と地盤とは攪乱力を家屋に与えます。それを受けて家屋は家屋自身の固有振動数を軸として自由振動が起こっていると解釈できます。或る一定振動数での強制振動は、その振動数だけの振動応答になるのですが、種々の周期成分を確率的に持つ強制振動では、応答側の周期成分の強さが変わりますので、必ずしも加振側と同じ振動数を発現するとは限りません。これらを個別に吟味してみましょう。家屋二階での振動応答は、方向別に明確に三つ (40, 3.5, 25 Hz) あります。これと対応する近接した振動数は、地盤上下動 (40~43Hz)、橋梁部上下動と捩れ (4.4, 5.1Hz)、地盤水平動 (27~28Hz) です。上下動は、地盤の上下動を直接再現していますが、水平動成分は近接してはいますが同じではありません。この内、家屋の 3.5Hz の振動、周期にして 0.29 秒、が低周波振動として苦情の対象になりました。しかし、この振動数は、橋梁の上下動の振動数と同じではありません。これが家屋に対して攪乱力として働くとするならば、空気振動を介すると解釈しなければなりません。この強制力は小さいのですが、家屋の方が振動し易い系であるので、大きな自由振動を発現することになりました。因みに、建築物の振動は高さ方向で水平の剪断変形が主役です。その固有振動の周期 (秒) は高さ (m) に比例し、その比例係数は、鉄筋コンクリート造で 0.03、鉄骨造で 0.02 が経験的に知られています (望月 重による)。対象家屋は 2 階建て約 8 m 高さですが、これから求めた比例係数は 0.035 となり、かなり剛性が高い構造であることが分かります。これが結果的には共振周期を近接させています。

10. 最近行った振動解析__トラス橋の例

10.1 最も多く架設されている橋梁形式

単純桁橋と単純トラス橋の常識が必要であること

日本は中小河川が多いこともあって、非常に多くの橋が架設されています。アーチ橋、斜張橋、吊橋などは、実用としての目的と同時に、その地域の景観を象徴的に構成するような意図を持って建設されます。このような形式の橋は、橋全体の数に較べれば僅かです。最も多く設計され、実用されているのが、中小あまたの単純桁橋、単純トラス橋です。桁橋は30m前後、それよりもやや支間を伸ばした60m前後の支間には単純トラス橋が多く架設されています。これらの形式は、初歩的構造とされているのか、橋梁工学の対象としてはあまり興味を引きません。その思い込みもあって、必修の技術教育から省かれる傾向があります。そのため、古い橋梁の調査をするときになって、あらためて、それらの橋の設計方法について基礎から勉強を始めることが必要になりました。

現況調査をなるべく簡単にしたいこと

モータリゼーションが始まる前、1960年頃までの道路橋は、特に歩道を設けず、2車線5.5mに気持ばかりの歩道幅を加えた7m程度の幅員が普通でしたので、その後の交通量の増加に対応するように、種々の対策が取られてきました。例えば、歩行者の安全を確保するため、歩車道を分離する歩道専用橋が多く併設されました。幅員を広くするには、桁橋では幅方向に桁の増設で対応する場合があります。トラス橋の場合、幅員が主構間隔で制限されますので、幅員を広げるような改造ができません。新橋に架け換えるのは最後の対策ですが、現状のままで、どの程度の耐力があるかを判定する調査が要望されるようになりました。その調査を基に、床版コンクリートや床組などに部分的な補強を考えます。この種の橋梁は数が多いので、一橋梁当たり短時間の調査でデータを収集して、流れ作業的に解析が得られるような、ハード・ソフト両面のシステムが必要です。床版コンクリートや床組など、交通荷重に直接接する部分は、こまめに日常的な補修が必要ですので、どのような形式の橋梁でも必須の管理事項です。主構造に耐荷力の余裕が有るか無いかを直接確認するのは、応力や撓みの測定ですが、これは作業がやや特殊ですし、予算も時間もかかります。振動測定は手軽で便利ですので、特に振れ振動を引き出して、その性質から橋の健全度を判定する方法を提案することにしました。たまたま、名古屋市郊外の矢作川中流にある加茂橋(図10.1)を調査する機会に恵まれました。加茂橋は典型的な単純トラス橋です。今後、この種の橋梁を調査するときのモデルケースとなりますので、測定から解析までの筋書きをこの章の前半で紹介します。後半に振れ振動を説明する理論モデルを解説し、それを応用して、対象橋梁の健康診断をする一つの方法を紹介します。



図 10.1 加茂橋 (愛知県主要地方道瀬戸設楽線 矢作川)

10.2 振動調査結果の概要

加茂橋の現況

この橋は、愛知県豊田市郊外の矢作川中流を渡る、支間 48m、2連の単純ワーレントラスであって、昭和 37(1962)年 3 月に建設された幅員は 7 m の 1 等橋です。幅員が狭い場合、桁橋で支間を伸ばすのは直感的に捩れに対して不安がありますので、トラス形式を設計に採用したのは常識的な選択です。床版コンクリート厚が 15cm、舗装厚 5cm ですが、何度か補修の経歴があります。主構造のトラス骨組みには、目だった損傷は見られません。しかし、近年の交通量の増加もあって、良く揺れると通報されるようになりました。その現況を知るためと、補修計画を立案するデータにするため、簡易な振動調査が中日本建設コンサルタントによって 2006 年 3 月 27 日に行われました。その方法は、3 成分の加速度計をセットとして、橋梁上の何箇所かを選んで、一般通行車両を加振源とした 1 回約 1 分間の振動計測です。測定箇所は、トラスの主構造の振動が得られる格点・床版コンクリートの振動が得られる場所・橋脚及び橋台、合わせて 10 箇所に抑えました。この橋の管理者である愛知県豊田加茂建設事務所の了解を得て、トラス橋本体の振動測定データを利用させて頂き、この章に概要と所見をまとめました。

測定箇所の選択には経験も必要であること

振動の性質を知るために加速度計を置く箇所は、求めたい対象を明確に意識しなければなりません。「良く揺れる」と人の感覚で判断して加速度計をセットすると、間違った結論を導きかねません。歩道や車道上で単純に計測すると、床版を伝わる音や局所的な振動が大きく得られ、場合によっては高欄の振動を拾ったりして、肝心の主構造の振動が求まらないことも起こります。そのこともあって、計測から解析までを合理的に計画するモデルとなるように意識しました。まず、トラス主構造の性質が良く得られるように、支間中央に近いトラス格点を選びました。橋支間の中央は格点の間になり、縦桁を含む床版コンクリート支間の中央です。ここでの振動では床版コンクリートの振動が大きくなって、主構造の振動の性質が隠されてしまいます。床版コンクリート上での振動体感は、トラス格点位置よりも格点間の方が大きいのですが、意識的に体感比較をしない限り差は分かりませんでした。一般の通行者が、この橋が良く揺れると言うのは、床版の振動についての体感が主であることが、測定によって具体的に分かりました。

振動は 4～8Hz が最も体感が大きくなること

人の体が振動を感じる度合いは、物理的な強さに比例しません。多くの人は平均して 4～8Hz に最大感度がありますが、個人差と同時に性差があることも知られていて、女性の方が敏感です（金沢大 梶川康男による）。動物の場合には別の感度レベルがあるのですが、これは分かりません。加茂橋の場合、主構造のトラスでは第一次の曲げ振動数が 3.3Hz、捩れ振動が 6.1Hz、コンクリート床版の横桁間の曲げ振動では 11Hz が得られました。これらは 4～8Hz の近傍ですので、良く揺れると言う通報を裏付けています。加茂橋の床版コンクリート厚は 15cm とやや薄く、部分的に劣化が進行していることが観察されました。やや健全と思われる床版では振動数が約 13Hz でしたので、11Hz を示すコンクリート床版部分は相対的に劣化が進んでいる箇所であることが分かりました。

トラスの捩れ振動が得られたこと

橋梁主構造は、平面構造力学を応用して設計しますが、立体的な性質については簡単な仮定を応用しています。幅員方向に対して偏った载荷になることを考慮するとき、横方向の荷重分配を単純に比例配分をして片側トラス面だけの設計を行います。実際には、立体的な性質があるため、片側に偏った荷重であっても、反対側トラス主構面の協力があるはずで、それを発生するメカニズムは捩れ剛性です。トラス橋は板桁橋よりもこの捩れ剛性が実質的に大きいため、同じ幅員の橋であっても支間を延ばすことができることが経験的に知られています。では、その捩り剛性がどの程度になるかは、殆ど知られていませんでした。加茂橋のトラス格点での加速度データから、トラス橋の捩れ振動成分として 6.1Hz が得られました。これは、部分的に格点の上下振動に見られますが、より明瞭なピークは、格点での橋軸直角方向の水平動に見られます。捩れ振動を明確に同定するには、橋軸中心に対して左右の位置での上下振動の差から解析するか、トラス橋では上弦材の位置での橋軸直角方向の水平振動で求めるのですが、路面と同じ位置での格点の水平動から同定できたことは貴重な経験になりました。

10.3 振れの性質を表す静力学モデル

殆どの単純橋は2主桁橋でモデル化できること

橋梁主構造として採用される最も基本的な橋梁形式は、左右に2主桁を並べ、横幅を支間方向に複数の横桁で繋ぎ、必要に応じて縦桁（ストリンガー）を並べ、鉄筋コンクリートスラブを載せて路面の平面構造を構成します。この基本的な力学系モデルを、概念的に図2で示します。主桁は、具体的には板桁・箱桁・トラス桁・RC桁・PC桁などです。左右の主桁は、概念的には3本の横桁で繋がります。中央の横桁は、左右主桁の協力の度合いを考えると意義を持ちますので、これを分配横桁と言います。鉄筋コンクリート床版も原理的には振れを伝える分配横桁に換算します。端横桁は、主桁の振れ剛性を考えるときには力学的に重要な意味を持ちます。そうでない場合であっても、立体的な骨組みを構成する実践的に重要な部材です。桁橋の場合、縦桁を兼ねて、幅員方向に複数の主桁を並べる形式も多く採用されます。このモデルは、後の10.5節で解説します。横方向に主桁を繋ぐ横桁は、その剛性が相対的に大きくなりますので、幅員が広がる場合以外、横桁の曲げ変形を考慮するような格子分配作用の計算をしません。また、振れ剛性を設計計算で考慮する方法も分かりませんでしたので、それを無視する仮定を使いました。これが、結果的には現実の耐荷力の余裕に寄与していて、古い設計の橋梁であっても、主構造が大きな損傷には進まなかった理由の一つです。設計モデルをなるべく実際の挙動を表すようにすることは必要ですが、橋梁は自動車や航空機とは異なって何十年もの長い供用を考えますので、安全側に見積ることを、あながち不正確或不経済である非難するべきではありません。

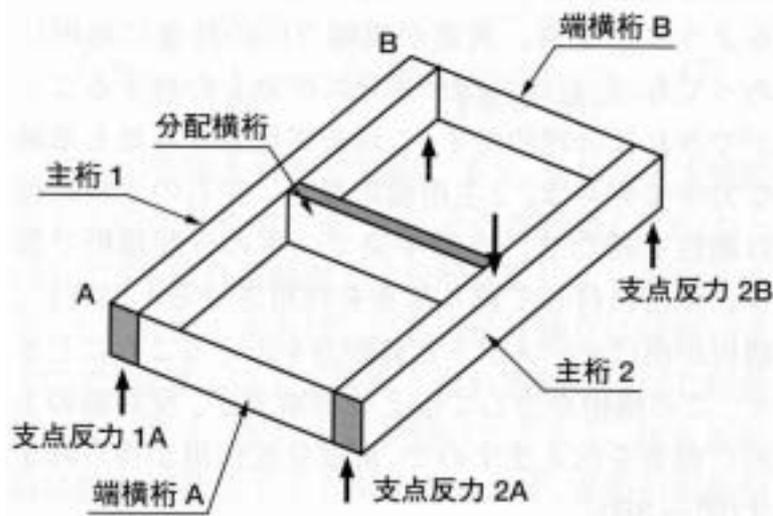


図 10.2 二主桁橋の構成概念

トラス橋は一種の箱桁橋であること

標準的なトラス橋は、左右2面の平面トラス（主構）を上下面の横構（ラテラル）で繋いで、全体として一つの箱断面に構成します。断面形がひしゃげないようにするため、対傾構（スウェイ）が必要です。下路橋はこれが通路を塞ぎますので、橋端でラーメン状の橋門構（ポータル）で補剛します。トラス橋はピントラスとして計算しますが、部分的にラーメン構造も必要です。主構面単独は立体的に不安定ですが、全体を箱断面にすることで安定な構造になり、振れ変形に抵抗できる構造になります。トラス高が低い橋は上横構を使わないポニートラス形式もありますが、トラス面が横に倒れないように、弦材の横方向の断面二次モーメントを大きくし、下横構も横桁の剛性を大きくする、などの考慮が払われます。一方、2主桁を使う板桁（プレートガーダー）も、箱断面でなければ、主桁単独は立体的に頼りない構造です。そのため、フランジ下面に横構を使い、上面のスラブ面と合わせて全体として箱断面に構成するのが基本的な構成であって、擬似的には立体トラスと同じ構成になっています。つまり、トラス橋と2主桁プレートガーダー橋は、力学的なモデルは同じ扱いができます。

荷重分配が生じるには捩れ剛性が必要であること

トラス橋の主構部を計算するとき、幅員方向に分布する荷重は、横桁を介して単純に左右のトラス面に比例配分します。この場合、横桁の主桁に対する作用を「荷重分配が(1, 0)である」と言います(図 10. 3A)。この仮定の場合、荷重が橋の主桁幅よりも外に出るとテコの作用で1以上の荷重が主桁に作用しますので、できるだけ主桁間隔を広くします。通常は歩道部分を張りだし、車道は主桁間隔の内側に入るようにします。荷重が橋幅方向の任意に場所にあっても、左右の主桁が等分に荷重を分担することができれば合理的です。これを実現させる最も単純な力学モデルは、2主桁橋の場合、左右の主桁に捩れ剛性を持たせ、支間中央で一本の分配横桁で繋ぎ、主桁に対して振り荷重を作用させると同時に、横桁が曲げモーメントと剪断力を伝えるようにします。この横桁を介して伝える剪断力が、反対側的主桁に荷重を伝えますので、荷重分配作用が得られます(図 10. 3B)。

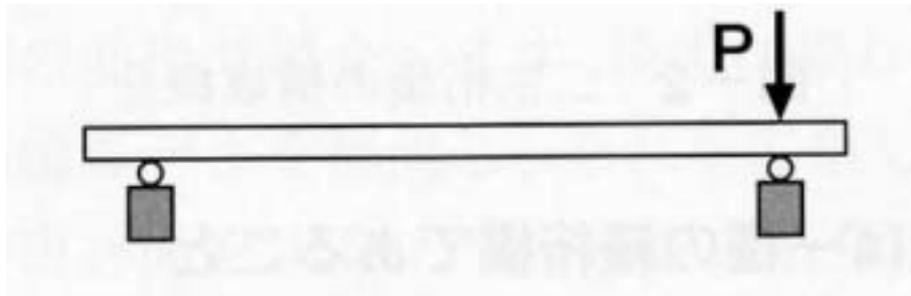


図 10. 3A 分配を考えない横桁

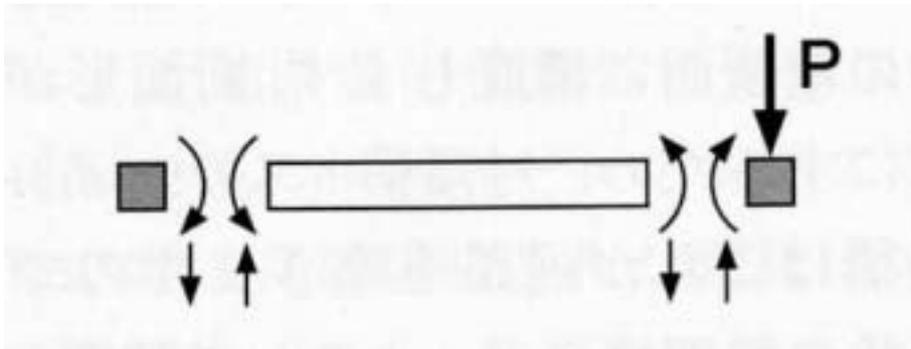


図 10. 3B 分配を生じる横桁

平面構造としては漢字の「日」形

分配横桁を一本配置した2主桁橋の力学的な平面構造は、単純に考えるときは英字のHに組みます。実際には支点でも横桁または対傾構で左右の主桁を繋ぎますので、全体構造は漢字の「日」の字を構成します(図 10. 2)。特に大きな2箱桁構造でもない限り、上下の反力を受ける支点は4箇所です。いま、例えば、右の主桁上に荷重があるとき、橋の骨組み全体の釣合を考えると、左の主桁を支える支点反力は0です。次節で解説しますが、主桁に捩り剛性があると、右の主桁上に荷重があっても、横桁が左の主桁にトルクと剪断力を伝達し、荷重分配が起こります。そうすると、左の主桁単独で見ると、支点位置でトルクと剪断力が発生しますので、支点反力が0となる外力の釣合条件と矛盾します。実は、この力が端横桁を介して右の主桁に伝えられますので、支点反力が0であることと矛盾しません。理屈はそうですが、設計のとき、床版と主桁を含む全体の捩れ剛性の大きさを見積もる具体的な提案ができませんでした。トラス橋の場合、トラス主構に捩れ剛性が期待できませんので、断面全体を箱断面にすることで全体として捩れ剛性が生じ、左右のトラス面間に分配が生じます。この様子は、FEM を使って立体トラスの解析をすると確認することができます。トラス下面のラテラルを省くと、荷重分配が起こりません。この理由から、2主桁のプレートガーダーであっても、下横構を省く経済設計は推奨できません。

二主桁橋の分配係数の定式化

最初に、2主桁のプレートガーダーで、主桁に何かの捩れ剛性がある1本横桁のモデルを考え、その分配係数の式を導いておきます。横桁に注目すると、この横桁は撓みと回転に対してバネ作用を持った支点上で支えられた梁と考えることができます(図4)。そのバネ定数 A_1, B_1 は、主桁の撓み剛性 EJ_1 と単純捩れ剛性 GK_1 とで計算されます。主桁支間の中央での値は、主桁ごとに

$$\begin{cases} \text{撓みのバネ定数 } A_1 = \frac{48EJ_1}{l^3} \\ \text{回転のバネ定数 } B_1 = \frac{4GK_1}{l} \end{cases} \quad (10.1)$$

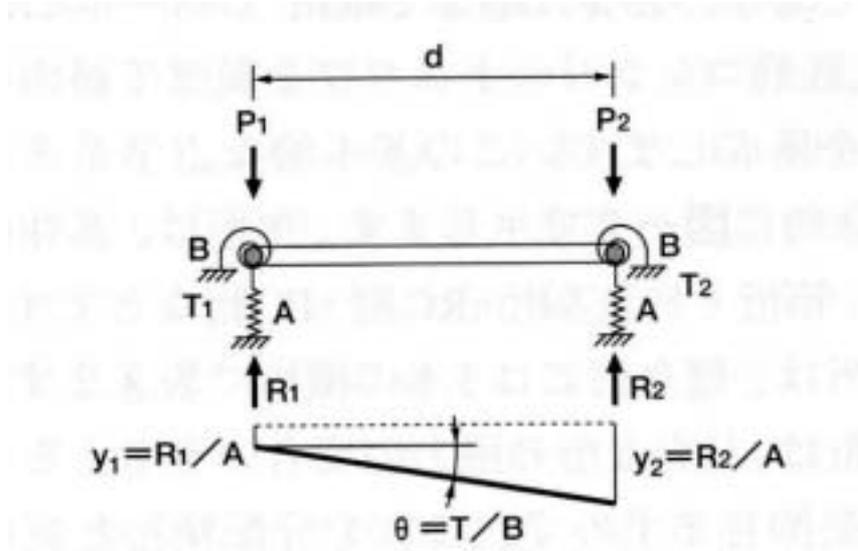


図 10.4 タワミと回転のバネで支持された梁

横桁の左右の支点上(番号1,2で区別)に載る荷重を P_1, P_2 、支点上反力を R_1, R_2 とすると、この反力が主桁に分配される力になります。

$$\begin{cases} R_1 = P_1 q_{11} + P_2 q_{12} \\ R_2 = P_1 q_{21} + P_2 q_{22} \end{cases} \quad (10.2)$$

q を荷重分配係数と言い、左右対称の2主桁橋では次のように求まります。

$$\begin{cases} q_{11} = q_{22} = \frac{C + B_1}{C + 2B_1} \\ q_{12} = q_{21} = \frac{B}{C + 2B_1} \end{cases} \quad (10.3)$$

ただし C は下で与える式です。この力学的な意味はこうです。もし回転のバネ作用が無いとしても、左右のタワミの差が見掛けの回転を与えますので、それを換算の回転バネ定数とした値を C で与えます。全体としての単純な捩れのバネ定数 B は、左右の回転バネ定数の和ですので $B = 2B_1$ です。橋全体をマクロに見たときの全体での捩れのバネ定数は $(C + B)$ です。ここに、 d は主桁間隔です。

$$C = A_1 d^2 / 2 \quad (10.4)$$

式(3)の荷重分配係数 q は、捩れ定数 B_1 が小さければ(1, 0)になり、 B_1 が大きくなると(0.5, 0.5)に近づくことを示します。これは幅員方向の荷重位置に関わらず、左右の桁が等分に荷重を受け持つモデルを意味します。

10.4 振れの性質を表す動力学モデル

二質点二自由度でモデル化する

単純橋の上下振動の性質をモデル化するとき、橋全体を1本の梁でモデル化し、橋の全質量の半分を支間中央の集中質点で置き換えた1質点1自由度の振動モデルが、実測現象と良く合います。固有振動数 f を求める原理式は、質量 M の質点と加速度 α の積で得られる力を静荷重として作用させたときの変位 y が、振動時の片振幅 y と等しいと置いた式です。 A_1 は式(1)のバネ定数です。

$$\alpha = (2\pi f)^2 y, \quad y = M_1 \alpha / A_1$$

$$\therefore f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{A_1}{M_1}} \quad (10.5)$$

並列2主桁の場合、主桁単位で1質点を当て、横桁の荷重分配を考えた2質点の動力学モデルを仮定し、上下方向の変位だけを考慮して2次元の同時変位マトリックスの形で立式します(図10.5)。

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \frac{(2\pi f)^2 M_1}{A_1} \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} \quad (10.6)$$

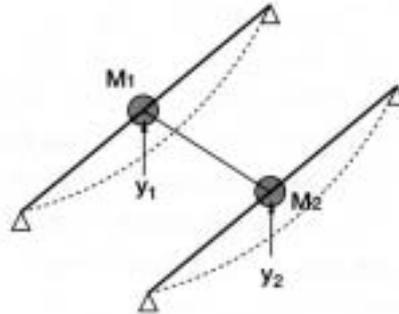


図 10.5 二主桁橋の振動モデル

対称変形と振れ変形の固有振動解がある

式(6)の同時式の解は、全体として上下振動をするときの解、 $y_1 = y_2$ の場合と、逆対称解 $y_1 = -y_2$ の場合、つまり橋としては橋軸回りの振れ変形の解があります。固有振動数は次のようになります。

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{A_1}{M_1}}, \quad f_2 = f_1 \sqrt{\frac{1}{q_{11} - q_{12}}} \quad (10.7)$$

式(10.7)の意味を言葉で説明します。全体が上下振動をするのは対称解であって、その振動数 f_1 は式(5)と同じです。振れ振動数 f_2 は分配係数によって変わります。(1, 0)分配であれば、左右の桁は独立に振舞いますので、計算上は上下振動と振れ振動とは同じ振動数になります。振れ定数が効いてくると、振れ振動数は撓み振動数よりも高くなります。実際の振動測定をして f_1 と f_2 が得られれば、分配係数が下の式(10.8)で、また、振り定数 $B = 2 B_1$ の寄与率が式(10.9)で得られますので、現実の橋梁の立体的な剛性が分かります。

$$q_{11} = \frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2 \right), \quad q_{12} = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2 \right) \quad (10.8)$$

$$\frac{B}{C} = \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 - 1 \quad (10.9)$$

分配係数 q_{12} が相対的に小さければ、立体的に見て偏心荷重に対して耐荷力が低く、何らかの全体補強をするのが良いと提案できることとなります。

10.5 多主桁並列の場合の力学モデル

捩れを考えないとスタレ構造になること

支間に対して相対的に幅員が広がる橋は複数の桁を並列にし、横桁で繋ぎます。局部的に作用する集中荷重に対して協力するように、全体の主桁を横桁で幅方向を繋ぎます。横桁の曲げ剛性を相対的に大きくして、横桁が曲げ変形をしないようにするのが合理的です。単純な力学モデルは、主桁支間の中央に一本の分配横桁を置きます。主桁の捩れ剛性を無視すると、主桁はスタレの骨のよう振舞いますので、横桁の荷重分配作用は簡単に計算できます。このモデルでは、集中荷重が橋幅員の端に載ると、平均以上の分配が起こり、反対側では浮き上がります。部分的な浮き上がりが起こらないようにする方法は、幅員の中央 1/3 幅（核）に荷重を作用させなければなりません。このスタレモデルでは、あまり合理的な設計になりません。主桁全体断面で捩れ剛性があると、偏心载荷によるトルクの一部が軽減され、荷重が主桁に等分布される方向に近づきます。この性質を表すパラメータには、前項の 2 主桁橋の分配係数と似た扱いになりますが、平均的な撓みとの比 r として式を扱います。

主桁本数全体を平均化して考える

並列する同寸法の主桁本数が 3 本以上の場合、この全体剛性が有効幅員 d に均質に分布した一体化した版断面、つまり、スラブ状のモデルを考えます。主桁全断面を考え、支間中央の撓みと単純捩れ回転のバネ定数 A 、 B は式 (1) を応用します。 $B=0$ であっても、左右の撓み差での曲げ捩れがありますので、その曲げ捩れのバネ定数 C は、式 (4) に換えて、断面二次モーメントの計算で得られる下の式を使います。

$$C = \frac{Ad^2}{12} \quad (10.10)$$

いま、幅 d のスラブの端に集中荷重 P が作用すると、この端の撓みは、全体が平均して受け持つとした撓み $y_0 = P/A$ の 4 倍になります。反対側の端は浮き上がり、その大きさは 2 倍になります。単純捩れ B が効いてくると、その大きさは下のように得られます。ここで、便宜的にスラブの左右端での撓みと平均撓みとの比を $r_1 = y_1/y_0$ 、 $r_2 = y_2/y_0$ とおきます。

$$\begin{cases} r_1 \\ r_2 \end{cases} = 1 \pm \frac{3C}{B+C} \quad (10.11)$$

一般論として、主桁を 3 本以上並列にした橋梁形式は、2 主桁の場合に較べて経済性に劣ります。その理由は、荷重が偏心して載る反対側が負の反力を受ける分だけ、載る側がテコの原理で荷重が集中するからです。したがって、合理的な分配を考えるときは、端主桁（耳桁）の剛性を大きくします。捩れ剛性が大きく寄与すれば、式 (11) から分かるように、 B が効いてきて全体が協力するようになります。実際の多主桁並列の鋼板桁橋、さらには RC、PC 桁を並列にした構造、またスラブ橋では、単純捩れ剛性 B の値を理論的に計算する方法が分かりません。振動測定をして、曲げと捩れの振動数が計測できれば、式 (9) を代入すれば B と C の比が求まります。これを式 (11) に代入します。

$$\begin{cases} r_1 \\ r_2 \end{cases} = 1 \pm 3 \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2 \quad (10.12)$$

撓みの固有振動数 f_1 よりも捩れの固有振動数 f_2 は高く得られますので、偏心载荷による端主桁に生じる一種の応力集中が和らげられることが分かります。この理論的なモデルが実際に良く表すかどうかは、とにかく、あらゆる機会を使って測定データを積み上げないと分かりません。

10.6 実橋における捩れ振動の測定例

明確な実測例は未だ2橋しか無いこと

実際の橋梁を振動測定した例は多いのですが、対象としたのは何れも特殊な形式の橋が多く、また興味の大部分は上下動の性質に注目した解析に偏ります(第8章表 8.1 参照)。橋軸直角方向や橋軸方向の振動も同時計測が試みられましたが、構造物本体の立体的な性質と直接関連付けることは行われませんでした。橋軸直角方向の水平動は、捩れの性質と連成して測定に掛かるのですが、捩れの作用についての認識もありませんでした。橋梁総数の大部分を占める一般的な桁橋やトラス橋の測定はあまり工学的な興味を引きませんでした。現時点では、明確に捩れの挙動を意識して振動データを解釈することは、前の9章で例示した共和高架橋と、この章の加茂橋しかデータを持ち合わせていません。共和高架橋は連続橋ですが、第1次の固有振動波形は1径間の単純橋と同じです。この2橋について、前項で説明した式を応用してみます。

二主桁構造としたときの分配係数の計算

トラス橋である加茂橋では、 $f_1=3.3\text{Hz}$ 、捩れの振動数は $f_2=6.1\text{Hz}$ です。この値を式(8)に代入すると、分配係数は、 $q_{11}=0.65$ 、 $q_{12}=0.35$ と得られます。これはトラス主構として(1, 0)分配の仮定で設計したとすると、35%の余剰耐力があると判断することができます。鋼板桁橋である共和高架橋は、耳桁の剛性が実質的に大きいと見なすことができますが、主桁本数が多いので、2主桁橋と見るのは少し無理があります。しかし、上下動の固有振動数は $f_1=4.4\text{Hz}$ 、捩れの振動数は $f_2=5.1\text{Hz}$ を、単純に式(8)に代入して換算2主桁橋としての分配係数を参考値として求めると、 $q_{11}=0.87$ 、 $q_{12}=0.13$ となります。この計算結果は、分配の効率がトラス橋よりも悪いことが分かります。

全体をマクロにスラブ構造とした場合の計算

共和高架橋の捩れの性質は、スラブ橋に近いと考えられ、式(10.12)を応用する方が実際に近いと考えることができます。この式で得られる(r_1 、 r_2)は、全体としての平均的な撓みに対して、偏心载荷の場合に起こる左右の端桁個別の撓み比を与えます。共和高架橋では(3.2、-1.2)となり、偏心载荷は反対側で浮き上がりが出ることを示します。捩れを考えないスダレモデルでは(4、-2)ですので、端での撓みが20%ほど低減することになります。参考のためにトラス橋の場合を計算すると(1.88、0.12)となり、偏心载荷があっても反対側で浮き上がりが出ないことになります。

捩れ剛性の向上の比率

式(10.9)は、単純な(1, 0)横桁分配の場合に較べて、橋全体の捩れ定数がどれだけ向上するかの比を与えます。共和高架橋では、寄与率は0.35です。この大きさの大部分は、鉄筋コンクリート床版によるものと推定されます。RC橋やPC橋の測定機会があれば、コンクリート構造の捩れ定数の実体ももっと明らかになるものと期待できます。これに対して、加茂橋は単純捩れ定数の寄与率が2.3倍になることが分かりました。この中には鉄筋コンクリート床版も多少は寄与しているでしょうが、華奢に見えるトラス橋の捩れ定数がかなり大きいことが分かりました。

付記

昭和15年(1940)、アメリカのタコマ吊橋が風にあおられて落橋した事故は、16mmフィルムによって、その崩壊の過程が記録されています。最初は、支間中央に節を持つ逆対称の上下振動であったのが、途中から同じく支間中央に節のある捩れ振動に変わりました。その振動数は上下振動と殆ど同じでした。タコマ吊橋の補剛桁はプレートガーダーでしたので、その捩り剛性が非常に低く、捩れ振動数と撓み振動数とは近接していたと考えられます。そのために最初の撓み振動が簡単に捩れ振動に移行したと推定できます。この捩れ振動は、風を受けてフラッター効果を発現する現象と同期し、結果として減衰が起きませんので、短時間のうちに疲労破壊に進み、崩壊につながりました。再建されたタコマ吊橋の補剛桁はトラス構造が採用されました。

同じくアメリカのゴールデンゲート吊橋も強風時に捩れ振動を誘発したことがありましたが、風通しのよいトラス補剛桁であったので、大事には至らなかったと言うことでした。この吊橋の当時の補剛トラスは、 π 形の対傾構を持っていましたが、この構造はトラス下面が開いていますので、捩れ剛性が殆ど期待できません。その後、トラス下面に水平構を追加して補強が行われ、全体として箱構造にしたことで、それ以降、捩れ振動は観察されないそうです。この話は故 平井 敦教授から聞きました。

11. 最近行った振動解析__隅田川の橋

11.1 診断システム開発のモデルとして

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、耐力、つまり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、医者への往診なみに、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で構成します。

健康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。したがって、健康診断では、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、簡単で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のか、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の提案が必要です。この詳しい仕様は、次章にまとめます。この章では、実際に多くの構造物を簡単に測定する方法を具体的に説明するため、東京の隅田川に架かっている橋梁群の振動測定をした経緯を報告します。

診断システムの仕様を詰めるためのモデル作業

情報技術(IT)が急速に進歩してきましたので、振動の測定から解析までのシステムは、外見的には非常に簡単になりました。個人の趣味でデータを収集することもできますので、取り立てて橋の管理者側や警察署などに許可を願うまでも無い程度で現場作業ができます。しかし、橋梁の振動測定は一般の人から見れば非常に専門的ですし、国によっては写真撮影や、立ち入ること自体も制限を受けることがあります。橋の上や周辺で不審な行動をしている、と見咎められると面倒ですので、事前に何らかの了解を得ておくのが無難です。隅田川の橋梁群の振動を測定したい希望は、筆者個人の趣味的な発想が出発です。同時に、この機会を利用して、診断システムの仕様を経験的・具体的に詰めることに目的があります。そこで、東京都の橋梁構造の専門官である高木千太郎氏に、個人的にお願いして了解を得ることにしました。しかし、簡易な作業で済むと言っても、前例がありませんので、管理部局の担当者に納得してもらうまでに多少の日時が必要でした。測定装置全体は、モバイルのパソコンを含めてショルダーバッグに納まる程度の小型ですし、歩道があれば作業は歩道の上で行えますので、一般車両の通行を妨げることもありません。測定は、実質二人で作業します。振動の加振は、特に荷重車をチャーターするまでもなく、一般の車両通行で充分です。橋の規模にもよりますが、重量の大きい大型車が走行すると良いデータが得られます。一回のデータは 40 秒程度の記録を単位として、橋梁上で数カ所を測定点として選びます。交通量の少ない道路では、大型車両の通過を待つ無駄時間がありますので、測定作業の能率が下がります。隅田川を渡る橋は交通量が多いので、一橋当たりの測定時間は 30 分も掛かりませんでした。橋の現場を車で移動する時間を含めて、朝 10 時から午後 3 時まで、昼食時間も充分に取って、実質 4 時間で 6 橋の振動状況を測定しました(橋の外観は図 11.1~11.6 参照)。



図 11.1 清洲橋(1928)自碇式チェーン吊橋
 $L = 45.72 + 91.44 + 45.72$



図 11.2 永代橋(1926)側径間つきタイドアーチ
 $L = 41.16 + 100.6 + 41.16$



図 11.3 中央大橋 (1992)不等二径間斜張橋
 ラス
 $L = 71.4 + 137.9$



図 11.4 相生橋(1988 架け替え)連続ト
 $L = 41.25 + 66.00 + 41.25$



図 11.5 佃大橋(1964)鋼連続二箱桁橋
 $L = 86 + 90 + 86$



図 11.6 勝鬨橋(1940)跳開橋+タイドアーチ
 $L = 86(\text{アーチ}) + 45.6 + 86(\text{アーチ})$

技能集団が未だ養成できていなかった

橋梁の振動測定から解析までの総合システムについては、筆者が構想を立て、その実践的な測定作業は、瀧上工業株式会社の橋梁技術部の橋本保則さんを始めとする若手の技術者と、ハードウェアをサポートする株式会社東京測器研究所の山下裕康さん、平岩健一さんらの、いわばボランティア的な協力で開発研究が行われてきました。実際橋梁の測定に応用することについては、既に何橋かの経験があります。測定作業は非常に簡単ですが、考えて見ると、これらの人々は、橋梁構造物についての一通りの常識がありますし、ハードウェアとソフトウェアの取り扱いに慣れていますので、隅田川の橋梁群の振動測定から解析までの作業を、短時間で済ませることができました。この作業は、実は非常に理想的なケースです。当初、橋梁工学を専攻している大学院の学生さんにアルバイト的に依頼する程度でも、多くの橋梁の測定データを集めることができる、甘く考えていたのですが、実情はそれほど「易しくない」ことが分かってきました。まず、ハードウェアとしての振動計測器を持っている研究室や企業が非常に限られている現実があります。解決の方法として、振動計測器をリースで使う手があります。計測器やパソコンを使う現場作業は、事前に丁寧なガイダンスが必要です。パソコンを前にした優雅な室内研究の感覚とは違いがあります。加えて、橋梁工学について一通りの常識が無いと、現場に行っても適切な測定箇所を選定することができなくて、ゴミ的なデータを拾ってしまいます。「橋の振動測定は簡単ですよ」と提案しても、じつは、測定作業を請け負う技能集団をこれから養成しなければならないことが分かってきました。

橋の振動レベルも小さいこと

一般論として、振動現象は、専門分野ごとに固有の課題があります。土木構造物は地震時以外には殆ど振動しませんが、橋梁は例外的によく振動する構造物です。しかし、その加速度振動レベルは非常に低く、良く揺れると言われる中小橋梁でも 0.2G 以下です。隅田川の橋梁群では 0.02G を超えませんでした。この大きさは、地震の震度で言えば 1 ないし 2 のレベルです。例外的な箇所は勝鬨橋中央のカンチレバー桁先端ですが、そこでも 0.2G 以下です。実用的な振動計測の加速度計の感度は、野外での移動や取り扱いの安全のために 2G の測定感度を持つものを使います。そうすると、測定レベルは実用感度の 1/100 の範囲ですので、測定データのデジタル量としては整数値として ±10 以内の微小な値です。振動波形をマイクロに見ると、滑らかな曲線とは程遠いパルス状を示します。理論に執着すると、粗いデジタル精度の波形は解析に向かないと思いがちですが、連続するサンプル数として最小限 2048 個を選んで統計解析に載せると、実用的に充分な振動数解析が得られます。自動車や列車などの振動は、橋梁の振動レベルと比較すると 10 倍以上で得られます。したがって、測定装置を自動車に積んで、車載のまま橋の振動を簡易測定する計画は、アイディア倒れになる危険があり、橋の方の振動レベルが隠されてしまいます。振動計などのセンサーは、橋梁本体に直接当てなければ、良いデータが採れません。

大衆化のために仕様を絞り込むこと

何かの計測を伴う検査を計画するとき、検査の依頼者側は、欲張って、あれもこれもと測定項目を増やし勝ちです。経験を積むと、どれが無駄であるかが分かるようになります。研究開発の途上では欲張った計測を意図的に増やします。その結果、報告書に利用しない多くのデータを捨てることとなります。失敗もあるのが普通ですので、それも重要な経験的知識と考えなければなりません。測定を受注する側でも、測定点数に単価を掛けて測定経費を見積ることが多いので、簡単な計測を提案し難い気持ちがあります。しかも、無駄なデータも予算を使った証拠として添付する羽目になり、報告書のページが嵩む割には中身が伴わないことが起こります。測定結果を統計的に積み上げるためには、研究上の多様な興味を捨象して、単純化・標準化・大衆化が必要です。これは、成果が確実に得られ、失敗の確率を下げる意図を持ちます。振動測定と解析は、研究対象としての奥行きが深いので、ハードウェア・ソフトウェアの一貫したシステムにしないと大衆化に向きません。例えば、公害振動計や騒音計は、標準化の提案を受けた製品です。これも、かなり専門的な道具です。構造物の振動を測って健全度を知ろうと言うシステムは、更に専門的になりますので、実用性を提案するには、仕様を絞り込むと同時に、かなり丁寧な解説が必要になります。

11.2 振動測定作業の実際

測定箇所を選択は現場で決めたこと

実践的な振動測定モデルにする対象に、東京都の隅田川橋梁群を選んだ特別な理由はありません。考え方は、比較的有名な橋であること、歩道がありますので交通規制をしなくても作業ができること、交通量が多いので特別に荷重車などの手配は必要がないこと、瀧上工業株式会社本社が中央区八丁堀にあって作業基地として便利であること、そして中央区の範囲内の橋を測定する許可を得るのが簡単であること、過去に測定したデータと比較ができること、などの理由です。測定箇所は、振動レベルが大きく得られる支間中央は必須であるとしても、現場に行つて測定箇所の変更や追加を考えることにしました。各橋梁の測定箇所は次のように決めました（図 11.9 参照）

- 清洲橋は、ケーブルに代わりチェーンを使った三径間の自碇式の吊橋です。主測定箇所は中央径間の中央と 1/4 点の鋼主構造上です。主塔は、地盤の性質および橋軸直角方向の振動が得られることを期待して、手の届く範囲の高さにセンサーをマグネット式ホルダーで装着しました。
- 永代橋は、鋼リブを主拱（アーチ本体のこと）とするタイドアーチですが、主拱が側径間に連続して延びているバランスドアーチです。アーチ系構造の振動測定では、支間中央と 1/4 点を主な注目点としますが、永代橋では、連続する側径間の中央も測定点に追加しました。
- 中央大橋は、支間の異なる変則的な二径間の斜張橋です。おまけに、短い方の径間は緩やかに曲線を描く特殊な構造です。理論的な振動モデルを簡単に仮定できませんので、主径間の中央一箇所を測定点に選びました。
- 相生橋は、主トラスが 3 面ある連続トラス橋ですが、更に斜橋になっている非常に特殊な構造です。斜橋は、直橋に較べて橋軸回り捩れの変形が大きく出ることが予測されます。このことを考えて、中央径間の支間中央で垂直材の手の届く範囲の高さの位置に測定箇所を設定しました。
- 佃大橋は、鋼 2 箱桁の三径間連続橋です。測定箇所は中央径間の中央です。主構造に直接加速度計を接触できません。歩道は箱桁の外側腹板の外に張出した構造ですので、歩道上での測定では、高欄付近と車道寄りの位置との 2 箇所を選び、結果を比較することになりました。
- 勝鬨橋は、隅田川の航路の中央に跳開桁部を持ち、その両側が鋼のタイドアーチです。そのため、実質的には 4 橋を測定することになりました。二つのアーチと二つのカンチレバー桁です。アーチ部の注目点は、常識的に径間中央と 1/4 点です。二つ跳開桁は、径間中央でヒンジ結合になっていて、実質的には支間 45.6m の中央での測定です。

加速度計と計測ハードウェア

加速度計は 3 成分が一体型ですし小型ですので、設置位置はかなりの自由度があります。簡単なマグネット式のホルダーにビス止めして使い、鋼製部材ならば、ケーブル長の許す範囲で、ある高さの箇所に簡単に装着できます。速度型のセンサーでは、このような簡便さがありません。トビ職などの協力が得られると、かなりの高所でも測定箇所に加えることができます。



図 11.7 加速度計（左）とレコーダ（右）



図 11.8 測定作業の実際（佃大橋歩道上）。モバイルパソコンはモニタです。無くても作業はできます。

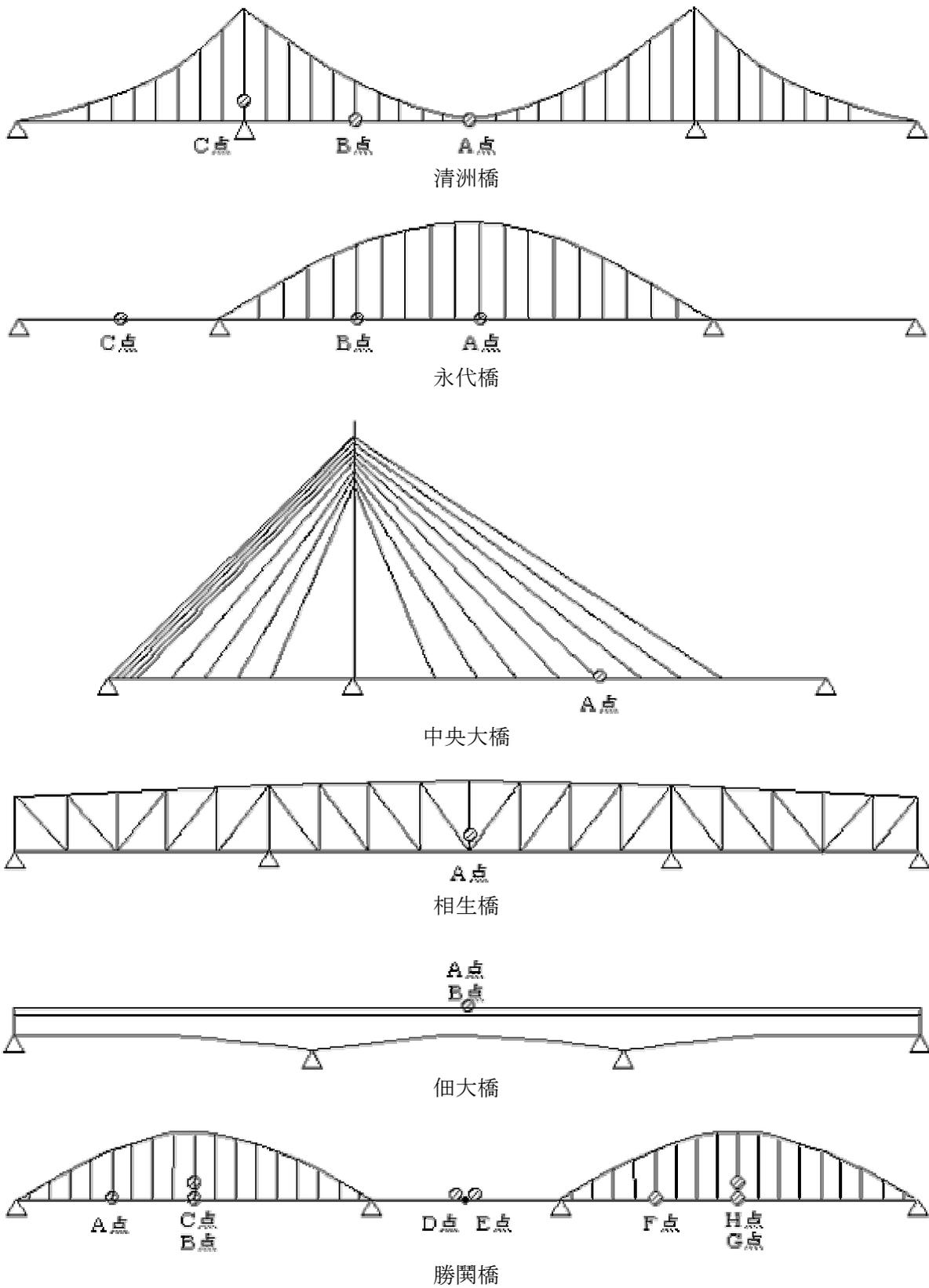


図 11.9 隅田川橋梁の振動測定箇所図 (下流側から見た位置)

11.3 データ解析の手順

測定ハードウェアと生データの記録方法

加速度計は、抵抗線歪みゲージ応用の三成分一体型（東京測器研究所製 ARF-20A-T）を使い、専用の小型ひずみレコーダ（同 DC-104R）に接続して使いました。このレコーダは、ブリッジに電流を供給する電源回路、バランス位置からの出力電圧を増幅する回路、それをデジタル化してメモリに書き出す部分とで構成されています。したがって、三成分加速度計測用センサーの利用に特化した仕様で使うようにして、煩雑な操作を減らします。現場測定作業では、パソコンは必須ではありませんが、モニタ画面が大きくて見易いので、全体システムの制御とモニタに使います。パソコンを使わないときは、ポケットコンピュータをベースにした PDA（携帯情報端末）を使いますが、これ無しでも測定ができます。これらの全体は、電源のバックアップなしに電池で駆動できます（図 11.7、図 11.8 参照）。データは時間的に連続したデジタル記録として高密度の外付けメモリに書き込まれます。パソコン処理との連携を考えて、64KB 単位でファイル化しています。この単位は、サンプリング数 8K、サンプリング間隔を 0.005 秒とすると測定時間としては約 40 秒です。通常の測定では、この継続時間を一回の作業単位とします。レコーダは、測定時刻や感度の設定値などの制御用データと、サンプリングしたデジタルデータとを、特殊な仕様でフラッシュメモリに書き込みます。

管理用のグラフの作成

レコーダ側で特化したデータ構造で記録した振動波形は、パソコン処理に向くようにファイル変換し、原始データとして管理します。ここで使うファイルは、テキストファイル形式の管理データ (*.hed) と、同名のバイナリファイル (*.dat) とで 1 単位です。従来は、振動波形をオシログラムで得て、それからデジタル化しました。オシログラムは、振動の全体像が眼に見えます。同じ目的に使う図をバイナリファイルから作成する図を**バイプログラム**と名称をつけました（図 11.10）。この全体波形を、時間軸をずらしながら刻々とスペクトル図に描いたものを**ランニングスペクトル**と呼ぶことにします（図 11.11）。この二つは、測定生データの管理用書類として使います。

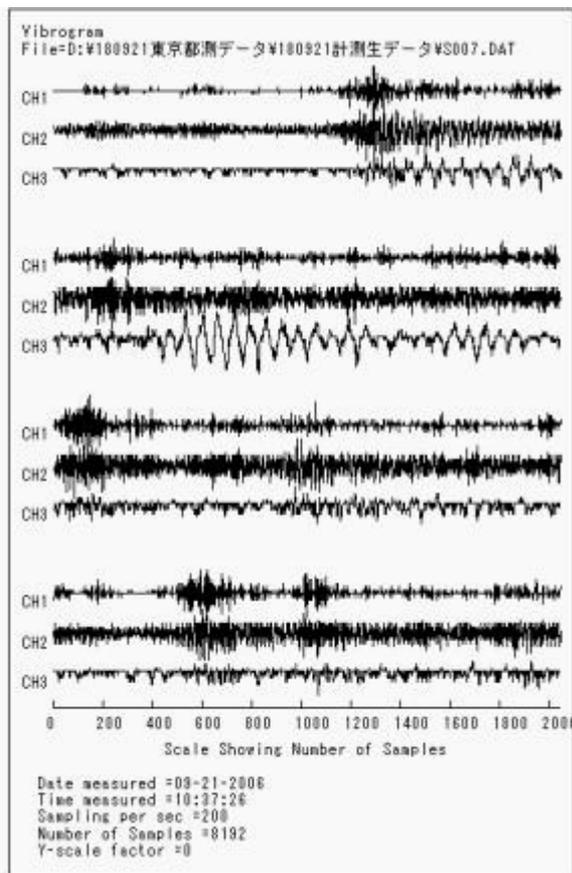


図 11.10 バイプログラム（清洲橋の例）

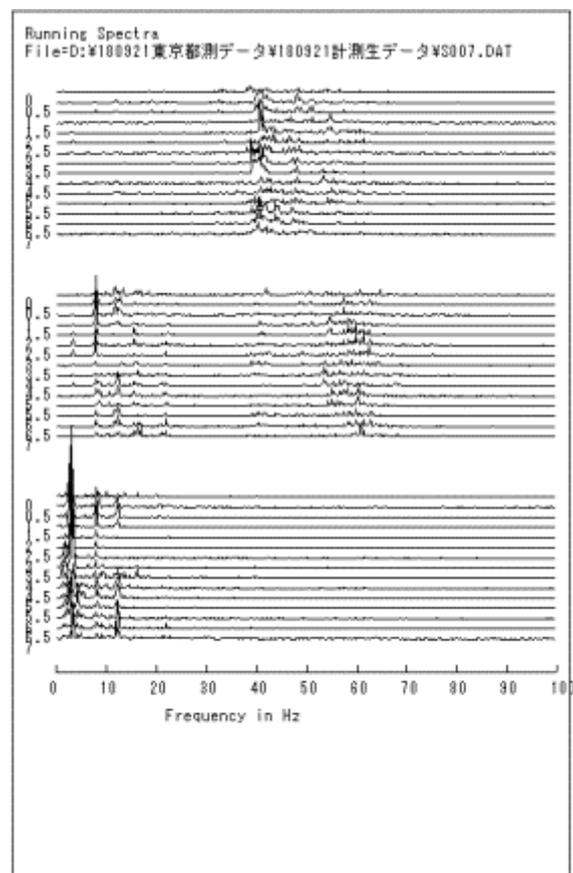


図 11.11 同じデータのランニングスペクトル

解析に使うファイルへの変換

前項で説明したバイプログラムとランニングスペクトルは、測定データ全体を省略なしに観察できて、この図のまま、かなりの知見が得られます。橋梁の卓越振動は、出たり出なかつたりする確率的な性質と、振動モードの節に当たる箇所では現われない気まぐれさがあります。ランニングスペクトルでは、卓越振動のピークが縦に並びますし、時間的に出たり出なかつたりする様子が分かります。有意なデータかゴミを測ったかも分かります。詳細な解析は、長い記録を部分的に切り出しますので、切り方次第では卓越振動を同定し損ないます。この二つのグラフを見て、詳しい解析に載せるデータ区間を決めます。このような生データの管理は、バイナリーファイルのままの方がファイル寸法を最小に抑えることができます。バイプログラムとランニングスペクトルは、測定した生データを眼に見える形で管理する目的に使います。そうしておいて、詳細解析に載せる振動区間を選んでデータを切り出します。ここまでの処理をするプログラムは、DataPreViewer として準備してあります。

解析ソフトは一般向けと専門家向けで異なる

パソコンの能力が格段に向上しましたし、便利なソフトも豊富になりました。エクセルは事務計算を指向した表計算ソフト (spreadsheet program) ですが、科学技術計算にも便利に利用できるようになりました。DataPreViewer は、一般のパソコン利用者が一寸した技術計算に使えるように、振動の生データからエクセルで処理できる CSV 形式のファイルに落とすことができます。フーリエ解析に載せるのは、標準として 2048 個のサンプルを使います。生データ全体を CSV ファイルに落としてから、2048 個のサンプルを切り出すのでは無駄が多いので、ランニングスペクトルを参考にし、区間を指定して解析用ファイルに切り出します。エクセルでは、フーリエ解析もできない相談ではありませんが、手間がかかります。CSV 形式は、中身がテキスト形式になったファイルですが、ファイルの種類を区別するため、拡張子を acc に変えて保存します。高速フーリエ変換を始め、少し凝った処理は、Visual Basic や C++ などのプログラミング言語で開発した専用の解析ソフトウェアが適していますので、拡張子は別名ですが、テキスト形式のファイルが扱いに便利です。

振動解析のソフトウェア

測定された振動の性質を解析するソフトウェアは、TimeProcess として準備しました。これは、2048 個にサンプリングされた 3 成分の波形を一解析単位としてまとめて処理するように標準化してあります。種々のグラフや数値のリストがモニタの作業画面に表示されますが、選択的に作業用のファイルに落とし、解析単位ごとに A4 のレポート 1 ページに要約します。解析見本は既に第 6 章第 6.10 図で紹介しましたので、それを参考にして下さい。大学などの研究者は、ソフトウェアを自分の作業に合わせて、Fortran などのプログラミング言語を使って自前で開発するのが常識ですが、一般の利用者には専門的に過ぎるところがあります。一般の利用者は、Windows 系のパソコンを利用することが普通になりましたので、ソフトウェアの開発は Visual Basic 6.0 で組みました。ソースファイルよりは、実行形式になったプログラムが便利でしょう。使っている内に、欲も出ますし、バグも見つかりますので、修正が頻繁に行われます。ユーザサービスに対応する窓口は別途考えることにしています。

解析結果の見方

橋梁の健康診断に簡易な振動を測定して求める作業は、1 橋当たりの手間を簡単にして、多くのデータを統計的な相互比較に載せるようにデータ処理を組み立てます。測定点数一つについて、A4 用紙 1 ページに結果を要約するのが実践的です。見本が第 6 章に例示した図 6.10 です。これは、病院のカルテに相当する資料です。この中身は少し専門的ですので、見方を解説します。まず、ページ先頭に対象測定点の管理データを表示します。振動解析は、解析に使う元の 入力波形 の観察から始めます。これは、全データを表示したバイプログラムから部分的に取り出したものです。この波形は一般にランダムな波形ですし、振動レベルが低いと波形図は小さくしか得られませんが、振動の傾向を見ることができます。ついで、相関関数 の計算をして図化します。自己相関関数は対角線位置の図、相互相関関数はその両側に配置してあります。上下動と橋軸直角方向の振動に強い相関があるときは、揺れを伴っている振動があることが分かります。自己相関関数は単位の衝撃を受ける振動応答を強調しますので、このグラフを再帰的に繰り返すと雑音成分が小さくなります。そこで、その自己相関関数のコサイン変換で スペクトル を計算するようになっています。減衰係数は、自己相関関数から AR モデルを仮定して計算して図化しますが、実際現象では揺れが多くて数値そのものの精度は高くありません。最後に、ページの下段に 最大加速度、卓越振動数、減衰係数 の計算値を抜粋して示します。

11.4 スペクトル解析のまとめと所見

上下動の卓越振動数が平均して低いこと

隅田川橋梁の卓越振動数の計算結果を表 11.1 にまとめます。スペクトル解析の周波数分解の精度が約 0.05Hz ですので、小数点以下 1 桁で丸めてあります。スラッシュ(/)で区切ったのは、1 次、2 次…と見つかった卓越振動数を示します。この判定は、ランニングスペクトルを参考にします。これを見ると、固有振動はピークが縦に並ぶのでそれと分かりますし、出たり出なかつたりする傾向も分かります。単発的な解析ではゴミも意味のあるデータと取り違えることがありますが、これを省く判断ができます。振動モード（対称・逆対称・捩れ）などは、数カ所の同時測定ではありませんので、今回の簡易測定のデータからは推定のコメントを付しました。上下動の固有振動数の統計的な性質は、設計時のタワミ制限で決まり、平均的な下限値は、 $1/1000$ とすると ($f=16/\sqrt{L}$) です。清洲橋を除いて、これよりも高い振動数が得られました。清洲橋は上下動に 1.2Hz があります。これは少し低過ぎますので、地盤・基礎が軟弱であることによる性質ではないかと推定しました。

捩れの性質もあること

隅田川の橋梁は何れも幅員が広いので、立体的に見て、水平面内で橋軸直角方向に曲がる変形は考えられません。戦前の橋梁（清洲橋、永代橋、勝鬨橋）は幾何学的な対称性がありますので、上下動振動と水平振動とに、独立性があります。これが相関を持つ振動数は、捩れによる振動であると推定します。戦後の橋梁（中央大橋、相生橋、佃大橋）は、斜橋や曲線橋であって、対称性に欠けますので、卓越振動数も多く得られますが、特に斜張橋の振動モードの推定には、今回の測定では資料不足です。勝鬨橋は同形式のタイドアーチが 2 橋ありますので、その比較は興味がありました。上下動の性質は殆ど同じ傾向を示しますが、月島側のアーチ橋が僅かに振動数が高く得られました。しかし、水平方向の振動数は、かなり性質が異なっています。橋塔、アーチの垂直材、トラスの弦材に振動計を付けて測定した意図は、橋の捩れ、もしくは水平動成分が強調されて測定に掛かると予測しましたが、部材自身の振動を大きく拾っていましたので、結果の報告からは省きます。これらの部材の接続箇所である主構造も、部材振動の影響が見られます。したがって、加速度計を設置する箇所を、もう少し吟味するべきであったと反省しています。今回の測定は、一種の予備的な診断ですが、かなり興味のある結果が得られました。これを見て欲が出て、もう少し詳しい測定をしたいとき、狙いどころをどこに絞ればよいか分かりました。

表 11.1 卓越振動数解析の要点

橋名	測定箇所(記号)	卓越振動数(Hz)			備 考
		上下動	水平動 橋軸直角	水平動 橋軸方向	
清洲橋	中央径間中央(A)	1.2	20	20	1.2Hz が全体系の上下動、約 3Hz が、逆対称モードの振動
	同 1/4 点(B)	2.9~3	8	40.	
永代橋	アーチ中央(A)	3.7	10	11	2.2Hz が逆対称モード、3.7Hz が対称モードと推定した。
	同 1/4 点(B)	2.2/3/5	7.4		
中央大橋	長径間中央(A)	1.6~3	15~18	15~18	中央大橋は曲線部を持つので、捩れを伴う振動が卓越している。
相生橋	中央径間中央	2.5/18	15		ややタワミが大きい
佃大橋	中央径間中央	2.9	3.5	3.5	健全と判定
勝鬨橋 アーチ部	1/4 点(A)	1.8/3.7	2.9	3.7	東京側アーチ。1.8Hz は逆対称モード、2.9Hz は捩れか？
	中央(B)	2.5/10		8	
勝鬨橋 跳開部	中央ヒンジ(D)	3.3	8.9		カンチレバーとして振動。加速度レベルは高いが健全と判定。
勝鬨橋 アーチ部	1/4 点(F)	1.8/3.9		10	月島側アーチ。逆対称モードは東京側と同じ傾向。
	中央(G)	2.3/11	11	10	

健全度の判定には統計的なグラフと比較する

供用されている橋梁が健全であるかどうかを単純に判定するには、固有振動数と支間との統計的な傾向と比較します。橋梁の設計では、死荷重と活荷重満載の状態での撓みについて制限があります。このことは、固有振動数 f (Hz) が支間 L の平方根に逆比例する傾向を示します。撓みの制限が支間の $1/2000$ の場合、その関係は、理論的に $f=22/\sqrt{L}$ です。例えば 100m 支間では固有振動数は 2.2Hz になります。隅田川の橋梁では、タワミを支間の $1/2000$ とする関係 ($f=22/\sqrt{L}$) に近いことが分かりました。測定された振動数が、この計算値より上であれば健全、下であれば注意が必要である、と判定します。隅田川の橋梁についての判定を言いますと、永代橋と佃大橋は健全、中央大橋と相生橋は戦後の架設ですが、まずまずと判定できます。勝鬨橋のアーチ部は、タワミ制限 $1/1000$ とする値に合い、やや剛性が落ちます。清洲橋は約 1.2Hz の低周波域の振動があります。この振動数は少し低過ぎるのですが、これは地盤・基礎との連成系による上下動と推定しました。今回は、橋脚や橋台上の振動測定を省きましたので、地盤・基礎の性質が得られませんでした。隅田側周辺は、軟弱な地層が多くありますので、これらの性質の振動調査をするのは、今後の重要な研究テーマであると考えました。

今後の研究課題の一つは加速時計の感度の改良

加速度計は、重力の加速度も測定できますので、縦横に向きを変えて重力(1G)で感度の較正ができます。これは便利なのですが、持ち運びのときに壊してしまう危険があります。これを避けるため、2G もしくはそれ以上の感度特性を持たせて機械的なショックに耐えるようにするか、クランプ機構を設けるかします。後者の方法は少し難しい面がありますので、実用的には前者の方法を取ります。そうすると、大きな橋梁では常時微動のような微小振動を測定しなければなりませんので、測定そのものが成功しないことが起こります。このことは当初から予想していました。隅田川の橋梁はどれも大きな構造ですので、あらかじめアンプ側で感度を高める対策を講じておきました。それでも、測定デジタルレベルとしては整数値にして±10 以下です。このような質の低いデータであっても、ソフトウエアで補って、実用に耐えるデータが求まることを、今回の測定で証明することができました。

橋梁は個性的であること

勝鬨橋には同形式のタイドアーチが二連あります。力学的な性質は、大筋で同じですが、詳しく見れば、大分違いがあります。つまり、外見が同じでも、橋梁ごとに個性があり、クセも違います。これらの異同は、個別に振動などの測定をしなければ分かりません。今回の隅田川橋梁の振動測定は、ほんの「一撫で」的な作業ですので、欲求不満で消化不良の感があります。しかし、これは、次回の測定のヒントになりますので、その繰り返しでデータを積み上げれば、対象橋梁の力学的な性質が次第に分かるようになります。この性質は、対象橋梁ごとに個性的です。研究者が陥り易い誤解は、実際橋梁を表すような理想化モデルがあると考え、複雑さを捨象することを研究目的とすることです。実物の橋梁の性質は、地盤・基礎などを含めた全体系で発現します。この意味で、世俗的に言えば、個性的な性質を解析することの方が興味深いところがあります。橋梁の専門家と自負する研究者は、もっと実物の橋梁と向き合う態度が必要です。また、学生を含め、若い技術者が橋梁工学に興味を抱いてくれて、実物橋梁に触る機会を増やすことを期待したいと思います。

12. 終章__構造物健康診断のシステム化

12.1 経験的知識と統計的知見

触って診断することが基本的方法

「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、二つの経験的知識があります。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と分かることです。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てはくれません。外から眺めていたのでは分かりません。人に聞いたり、文献に書いたものを読んだりしても、眼学問・耳学問的知識は得られても、納得した知識にはなりません。つまり、実際に触って、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」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の提案です。体感的な知識に代えて、計測器を使ってデータを数値化することで、経験的知識を共有することができます。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。

経験的知見とは統計的知見であること

経験的な知識と言うと非科学的であると思われるので、同じことに統計的方法を加えて科学的らしく見せると、幾らか信用してもらえます。統計的な方法は、結論の範囲に幅を持ち、数学的に精度の高い数値が得られませんので、非常に了見の狭い学者は、統計的な手法を学問ではないと軽蔑する風潮がありました。その冷たい眼差しに対抗するには、無理してでも、やや難解な理論モデルを立てることも行われます。構造物の診断システムも、診断の結論を数学的に厳密な数値として求めるのではありませんので、おおらかに結果を解釈しなければなりません。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るので、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。システムを構成する個別の項目は、他の項目と密接な関連を持ちます。それぞれについては、詳しい説明が必要ですが、ここでは基本的な考え方をまとめます。

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術集団があります。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、などの通報があつて、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（故菊池洋一教授からの聞き伝え）。鋼橋では、疲労で亀裂が発生しても直ぐには破断に進まないことが多く、その余裕が1ヶ月くらいあることが疲労実験で分かってきました。これも経験的な知見です。コンクリート構造の場合には少し物騒なところもあつて、通行車両ごと落橋した例があると聞きました。

12.2 記録を残す方法

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。個人を対象とした典型的な公的カルテは戸籍謄本です。私的なカルテが履歴書です。学歴・職歴などの細項目があります。個人的には、オリジナルを作っておいて、それに追加を記録して保存し、必要になったときに、オリジナルから写します。つまり、カルテは記録の追加がある資料です。日記や日誌はカルテ的な性質を持ちます。保存の対象となる資料を**アーカイブ**(archives)と言います。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た内容を持つ資料です。人の場合には本人が死亡すると、そこで記録を終りとしますので、それを公的に保存する対策を講じるとアーカイブとなります。

追加を考える記録方法が重要

カルテのような資料は追加がありますが、一人の人が継続的に管理できるのは稀です。人が代われれば書き方も変わりますので、定型的な書式が無いことが多く、手書きのメモが並びます。後で清書や書き換えも行いません。重要なことは記録の継続と保存を頑固に保守的に守ることです。カルテからデータを抜粋して電子化資料にしたものは**データベース**に使えますが、カルテ本体を電子化するのでは二度手間です。データベースは、資料本体が別にあって、その所在情報を扱うのが利用目的です。カルテに不必要な多量の記録を残すのも困りますので、カルテの用紙や、それを綴じ込むファイルの物理的な体裁やデザインを統一する、などの知恵を使います。構造物の場合でも、補修の履歴などを保存するカルテがあると役に立ちます。橋梁の場合、**橋梁台帳**と言われる資料がカルテに当たります。しかし、手書きのまま書類を管理する方法の伝承と教育が殆ど行われていません。管理を考えると、データベースのような電子化書類管理をすぐ考えるのですが、この方法では写真やメモ的な書き込み情報が失われる欠点があります。手書きの資料をそのまま保存すると嵩張って場所を取りますので、要領よく書くと同時に、縮小保存の方法も考えます。美濃紙に墨で書き込んだ古文書が永く保存できるのは周知のことです。現代ではやや古典的ですが、銀塩のマイクロフィルムの歴史が古く、比較的信頼性があります。電子化書類は、記録媒体と読取り装置の仕様がどんどん変わりますので、注意してバックアップをしないと読めなくなる危険があり、また、その被害も起きています。

構造物のカルテ的な資料構築を考える

構造物の維持補修には、構造物単位での、言わば、カルテが必要です。データベースの場合は複数の構造物を扱いますので、考え方が違います。橋梁は公共構造物ですので、多くの人が興味を持ってくれるのは有難いのですが、原簿に相当する資料管理が巧く機能していません。データベースを作成する場合、出典が確実であるのは稀であって、資料の孫引き引用、悪く言えばツマミ食いが普通です。支間長などの間違い引用は珍しいことではありません。実際の橋の設計図などは、管理者側で保存していないことが多く、その橋の製作・架設会社側に資料提供を依頼するのが現実です。つまり、技術資料管理は、官ではなく、民間ベースで支えられています。構造物の維持管理システムが実現するためには、管理者側に法的な拠り所が必要だからです。管理者側は、旗を振ることはしますが、規則がなければ実作業をするための自前の組織を立ち上げることができない、というジレンマがあります。

報告書は残らないのが普通

病院は研究機関ではありません。何かの調査をした報告書や論文は、カルテとは質が違います。これらは、それを書いた側、または書かせた側に軸足のある資料ですので、データの選別やツマミ食いがありません。また、書いた側もしくは受け取った側で保存の対策を講じない限り、それが公的記録として残ることはありません。アーカイブ的に資料を保存するためには、それなりの設備・組織・運営をしなければなりません。一般企業で報告書をまとめるときは、記録保存を考えないのが普通です。事務的には予算を使いますので「作成した」証拠として使います。したがって、当該年度が済むか、担当者が変われば、報告書を廃棄して何も残さなくても事務的な責任はありません。重要と考えられる資料は、大学などの研究機関であっても私的に蓄積されます。権威づけされた学術誌に論文として採録されると成果が残りますが、それらの元となった資料は残りません。

12.3 測定から解析までの標準化

標準化の考え方

何かの測定をする場合、得られたデータを判断に使う最も単純で基本的な方法は、別の対象で同じ測定をしたデータとの比較です。比較に使うデータの数が多ければ、測定結果を客観的に判断することができます。相互比較を可能にするためには、測定方法全体を通して、幾つもの標準化を踏まえ、振動測定に関する標準化では、一般利用を考えた振動計・騒音計の仕様が JIS 規格で決められていて、それに準拠した製品があります。これらの測定器は、人の体感に合わせるように内部の電子回路で測定値の補正を行っています。これは、振動の絶対的な強度を表すのではなく、人が体感できる最低の振動レベルを基準とし、その何倍の強度で振動しているかをデシベル単位で表す整理方法です。構造物の診断に使うならば、その目的に合わせてデータを整理します。学術的な研究目的を考えた振動測定システムならば、多様な要求を考えてもよいでしょう。しかし、全国、さらには全世界に存在する何百万もある橋梁の現況を調べ、相互の比較を可能にするためには、仕様を限定し、取り扱いを簡便化し、多くの人が独立に測定できるような標準化システムがあると便利です。この測定は大衆化を意図しますので、一種の予備的な診断に位置付け、その結果を見て、もう少し詳しく調査したいとなれば、それなりの専門的な対応を考えればよいでしょう。

マニュアルの功罪

公共の構造物は社会生活と密接に関わりますので、管理者側は安全対策に神経質です。その対策の一つのアイデアとして、指針・点検マニュアル・簡単な診断法・応急処理の手引きなどの書類を作成することが多くなりました。この趣旨は、自前の対策活動が難しいか、手が足りないのを補うために外部に作業を依頼することを前提としていますので、考えてみれば非常に官僚的な発想です。作業方法や要求事項を決めますので、ここに標準化の考え方を導入します。これが仕様ですが、この中身がどうしても専門的になります。専門家は意義が頭に入っているでしょうが、一般の人が、常時見る資料ではなくて、何かの要請があったときに始めて参考にします。橋梁の点検や診断では、橋梁工学についての一通りの知識が要求されます。特に、古い橋梁を調べるときは、その当時の設計法や技術レベルを理解していなければなりません。コンピュータの利用が便利になりましたので、昔の古典的な手計算の設計方法を時代遅れだと速断する傾向があって、学校教育で教えなくなりました。そこで、改めて旧来の設計方法を勉強し直さなければならない、という空洞現象が起きています。橋梁の技術者であっても、必ずしも旧来の設計方法を理解しているとは限りません。まして専門外であれば、さらに話は通じません。したがって、橋梁の健康診断法を提案するとなると、矛盾するようですが、一般の人であっても、専門的な協力が得られるような、噛み砕いた、大衆化した方法を提案しなければなりません。これがマニュアルにまとめる本来の趣旨です。構造物の診断法を、身近な、人の健康診断法との類似で説明するのは、それが理解を助けると考えたためです。

画像処理やコンピュータ計算を過信しないこと

構造物の外観を肉眼で見ることは初動調査の基本です。構造物の外見を見て、ペンキが剥げた、少しキズができたなどは、人の場合の一センチのケガに相当しますので、素人判断でも対策の提案ができます。写真やテレビに撮影した映像情報は視診の助けになります。人が立ち入れない環境では特に効果的です。その映像情報をデジタル画像処理すれば、もっと詳しい診断データが得られると考えてはなりません。科学技術に利用する映像資料は、色の違いなどの情報を解析する目的よりは、幾何学的な情報を得ることに使うのが基本です。映像情報をカラー撮影で得たとしても、報告書などにはモノクロコピーで引用することも少なくないからです。したがって、形・寸法・位置などが分かるような撮影を心がけなければなりません。映像情報を分析して、具体的な耐荷力の診断資料が求まることはあり得ません。逆に言えば、もし映像情報が診断に有効であるなら、いままでに得られた多くの写真を使っても診断ができるはずだからです。振動の性質をコンピュータ処理で求める場合であっても、結果の解釈と判断は慎重でなければなりません。例えば、固有振動数をフーリエ解析で求めるまでは数学的な処理ですので、数値の解釈の段階では、工学的な判断をしなければなりません。有効数値も、3桁以内に抑えます。これは工学的なセンスですが、一般の人が利用する解析では、桁数を抑えることも標準化仕様に含まれます。

専門的な測定器が必要になること

工学的に言うと、構造物の検査方法を破壊検査と非破壊検査に分けます。自動車など、大量生産される工業製品は、実物を使って破壊するまでの試験ができます。材料試験は、部分を使う代表的な破壊検査です。構造物では、部材単位までならば破壊試験ができます。破壊させないで健全度を調べる方法が幾つかあります。実物を測定するのが最も良いのですが、それに代わる方法として模型を使う方法、そして数学モデルによる方法があります。コンピュータの利用が便利になりましたので、多くの研究者が数学モデルを使った理論解析に手を染めます。しかし、実物と向き合って測定で確かめることをしなければ、仮説か空論に過ぎません。実物測定は、測定装置を始め、作業性の面で多くの制約を伴いますので、研究がなおざりにされていた節があります。最近数年間を見ても、電子技術・情報技術の進歩が非常に早くなりましたので、以前ならば高額で特殊な設備であった測定システムが、普通に使えるような大衆化に進んでいます。パソコンがその典型です。したがって、測定装置の方も簡易化すれば、構造物の点検と診断システムの大衆化ができます。前章まで解説した実構造物の振動測定の経験は、筆者が以下で提案する診断システムの仕様に反映しています。

破壊の監視と測定による診断

構造物は多くの部材の集合で構成され、それぞれの分担がありますので、構造システム（組織）と捉えます。振動は、構造物全体としての挙動と共に、部分的な振舞いもありますので、無定見に振動を測っても、その解釈に苦しむことが起こります。例えば、橋梁の振動を歩道床版の上で測定すると、高欄の局部的な振動や、床版単独を振動が強調されて、主構造の振動の性質が隠されてしまうことがあります。折角測定したのだから、と意義があるように扱おうと間違えます。部分的な損傷、例えば亀裂や破断は、システムを構成する部材の問題です。この構成のとき、構造物全体としての静定・不静定の常識がないと診断を間違えます。静定な構造系であると、部分の**破壊**が全体の**崩壊**につながります。したがって、構造システムとしての設計は、意識的に不静定の構造系にします。そうすると、部分的な破壊がすぐには全体の崩壊に進みませんので、部分の破壊を監視するのが点検です。部分的な破壊が見つかったとき、または構造物全体として耐荷力が下がっていることは眼で見ただけでは分かりませんので、診断したい。そこで振動測定方法の提案となります。測定は、客観的で相対的なデータを得るための手段であって、他に測定したデータと比較して診断します。当の構造物について知識を持つ専門家は、比較の際に多くの経験的な情報を総合して診断できます。しかし、一般の人でも、そこそこの診断ができる程度の大衆化を持たせます。それは、標準化した測定方法の提案と同時に、比較に使うデータを公開することです。例えば、橋梁の固有振動数を測定で得たとして、それが統計的に得られている振動数の範囲内であれば、差し当たっては健全と判断してもよいとします。比較に使うデータは、多ければ多いほどよいので、一般の人の測定データであっても、どこか1箇所に集まるように、資料の提供を受ける窓口が欲しいところです。

庶務とは雑用のことを言います

何かの問題があって、相談を受け付けてくれる最初の窓口を知っていると便利です。多くの企業体では、庶務課や庶務掛がこの窓口です。「庶務」のような漢語を使うと格式張って偉そうな職場と思うでしょうが、分かり易く言えば雑用係りです。専門的な問題の相談事を商売とするのがコンサルタントです。ここに学識経験者が呼ばれることが多くなりました。最近ではインターネットでデータベース検索するのが便利になりました。しかし、そこは、具体的に問題を解決する場ではなく、適切な部局に依頼する、または紹介する、などが主な仕事です。全体を理解していないと、どこが担当窓口であるかが分かりませんので、経験豊富な人が庶務を担当します。庶務は口利きが仕事になりますが、紹介した先が対応してくれないと困りますので、庶務の担当者はある程度の権限を持つのが普通です。学識経験者を呼ぶのは権威付けです。実際に作業をする部署は「管理」の名称が付きます。ハッキリとした専門分野がある場合には、分担の方法を決めます。これを「分掌」と言い、作業の範囲を規約などで決めます。しかし、定型的な範囲から外れる作業も少なくありませんので、言わば下請けに作業を依頼します。家庭では、家の中の雑用一般を家事と言い、英語では house keeping です。この用語は企業における管理業務の意味にも使います。家事は女性の仕事という先入観があって、男性は家の中のことに関心を持たないことが多く、その延長として、企業における管理についても、自分で努力するよりは他人任せが多くなります。「維持管理」は、本来、自分で解決する問題です。そのこともあって、簡易な振動測定を自前で実施する習慣を育てたいものです。この振動調査と診断法の連載はこの章で一区切りとします。別添として、診断システムの仕様(案)と、振動計測ハードウェアの資料をまとめてあります。