

MATLAB を用いた振動計測・解析システムについて

Experimental Investigation of Vibration Monitoring System by using MATLAB

北海道大学大学院工学研究科	学生員	宮森保紀 (Yasunori Miyamori)
北海道大学大学院工学研究科	正 員	小幡卓司 (Takashi Obata)
北海道大学大学院工学研究科	正 員	及川昭夫 (Akio Oikawa)
北海道大学大学院工学研究科	○学生員	鈴木 隆 (Takashi Suzuki)
北海道大学大学院工学研究科	F 会員	佐藤浩一 (Koichi Sato)
東洋技研コンサルタント(株)		米田健一 (Kenichi Yoneta)
北海道大学大学院工学研究科	学生員	安達一憲 (Kazunori Adachi)
北海道大学大学院工学研究科	学生員	広岡 勉 (Tutomu Hirooka)

1. はじめに

我が国では第二次世界大戦後の国土の復興とその後の高度経済成長において、鉄道、道路、港湾、空港を始めとする社会基盤施設が非常に数多く整備された。橋梁構造物は、1954 年の第一次道路整備五ヶ年計画から、高度経済成長期を経て 1970 年後半までに非常に多くの道路橋が架設された¹⁾。現在においては、これらの社会基盤施設の年齢は壮年期にあると言われており、2010 年前後から供用後 50 年を越える橋梁は急激に増大し、2021 年には老年期を迎える橋梁は 5 万橋以上になることが予測されている。基盤施設の老朽化は回避できない問題ではあるが、これを適切にコントロールすれば社会資本の充実を図ることは十分に可能であり、持続的循環型社会の実現や地球規模での環境負荷低減に大きく貢献することは自明と思われる。

近年、既存構造物の保有性能の検討や健全度診断を行う一手法として、振動モニタリングデータの活用が期待されている^{2~8)}。従来より、振動・音響等の計測は例えば実応力等の測定と比して手軽に実施することが可能であることが知られている。最近では、計測装置あるいは情報処理技術の著しい進歩から、測定から解析までのプロセスを非常に高速かつ高精度で行えるようになってきた。これらにより、従来では定量的な把握が比較的難しかった、減衰比、位相あるいは局部振動に起因するモード形状等の情報も詳細に得られるようになりつつある。

以上を踏まえて、本研究では社会基盤構造物の振動モニタリングを、特別な専門知識を必要とせずとも容易に実現できることを目的として、統合的な振動計測・解析システムの開発を行った。具体的には、ノート型 PC に実装された MATLAB の Data Acquisition Tool Box⁹⁾を利用して、DAQ カードあるいはサウンドカードから直接データを取得し、フィルタリングによるノイズの除去、スペクトルを用いた卓越振動数の把握から減衰定数の算出ならびに卓越モードの確認等を一貫して行えるシステムを構築した。また、本システムを用いて実橋において振動測定実験を実施し、有効性あるいは実用性等に関して検討を加えたので、ここに報告するものである。

2. 振動計測・解析システム

本研究で構築したモニタリングシステムは、図-1 に示すように加速度センサー、動ひずみ計ならびにノート型 PC からなるものである。加速度センサーと動ひずみ計に関しては、DAQ カードに接続可能なものならば機種、種類は問わないため、本章では PC を中心とした測定・解析方法等について述べることにする。なお、今回用いたノート型 PC は、DELL INSPIRON 3800 (モバイル Pentium III 650MHz, SODIMM 256MB)であり、現在の高性能 PC に換装すれば、容易に性能向上も実現できる。

本システムにおける測定・解析エンジンには、前にも述べたとおり MATLAB を採用して各種機能についてのプログラム開発を行った上でこれらを GUI にて統合し、PC 上に図-2 に示す仮想的な測定・解析器を実現した。

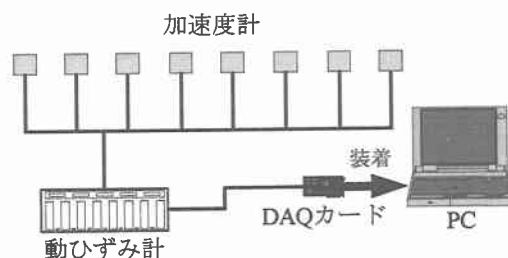


図-1 振動計測システム

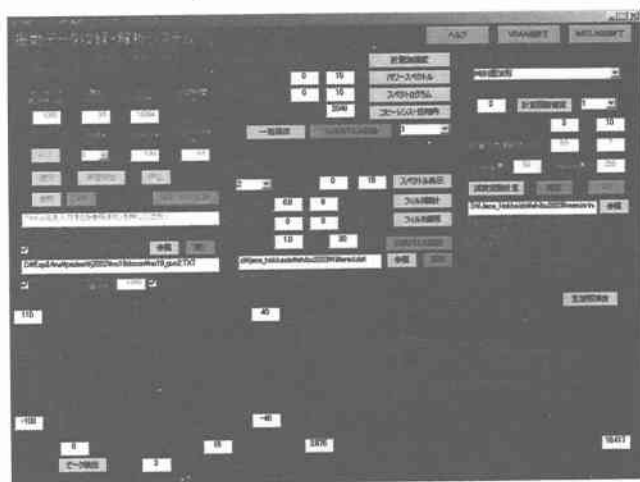


図-2 振動計測・解析システム操作画面

まず、測定機能に関しては、DAQ カード 1 枚に対して 8Ch の測定が可能であり、サンプリング周波数は最大 200kS/s まで対応されている。トリガー機能としては、任意の Ch に所定の閾値で設定でき、プレトリガーのデータ長も可変である。また、市販の測定機器ではデータ個数が制限されているものもあるが、本研究では PC を用いているため基本的には無制限であり、高次振動の測定にも威力を発揮する。なお測定された波形は、例えば 1Ch 毎、全 Ch を重ね書きといった各種の表現で表示させ、即座にプリントアウトも可能であるため、現場での確認にも有効と思われる。なお、本システムはデータの読み込み機能も備えており、時系列でデータを記述したテキストファイルであれば、他のシステムで測定したデータでも容易に解析を行うことができる。

次に、フィルタリング、スペクトル解析等の主な解析機能について述べる。一般にフィルタリング^{10,11)}は、ノイズや卓越する振動数が複数含まれる応答波形から必要な情報を取り出す場合にしばしば適用される。本研究では IIR 型楕円フィルタ等、合計 7 種類を用意しており、計測された波形に応じて柔軟に対応することができる。フィルタの設計は通常ある程度の専門知識を要するが、このシステムではフィルタゲインと波形のスペクトルを同一画面に表示することにより、ゲインの調整やパスバンドの設定等を視覚的に確認しながら容易に設計が行えるよう配慮した。また、スペクトル解析は応答波形の卓越振動数を検討する上で非常に重要な機能の一つであるが、本システムではフーリエスペクトル、パワースペクトルの解析・表示機能に加えて、スペクトログラムを追加することとした。このスペクトログラムとは、振動スペクトルの時間的変化を図形の濃淡によって視覚的に判断できるように表示したものであり、色の濃い部分がスペクトル成分の大きい部分を示している¹²⁾。計算方法は、デジタル信号に対して適当なデータ点数に分割して窓関数を適用し、離散時間フーリエ変換を行ってこれを表示するものである。減衰定数の把握に関しては、波形から直接算出する方法と、ハーフパワー法の 2 種類を用意した^{2),13)}。波形から算出する方法は、ノイズ等の影響を強く受けるためデジタルデータから直接的・自動的に求めることは若干の困難が伴うが、本システムではフィルタリングによってノイズを除去した後に、卓越振動数の情報から 1 周期毎の最大応答値を求めて減衰定数を計算し、波形に対する減衰曲線の妥当性を視覚的に検討して決定するようなプロセスを採用している。ハーフパワー法による減衰定数の推定を用いる際には、パワースペクトルの求め方がしばしば問題となるが、本研究ではフーリエスペクトルから求める方法と、Welch 法を用いた方法の両者から減衰を計算し、比較できるよう配慮した。加えて、卓越モードの把握に関しては、コヒーレンスの計算から、現場にて即座に検討が可能である。コヒーレンスは、異なる 2 つの信号の関連性と位相差を比較することによりモードの推定を行うもので、いくつかの卓越振動が波形に含まれている場合に威力を発揮する^{2),13)}。

以上が本研究における振動測定・解析システムの概要であるが、MATLAB の各種関数を利用することによりさら

なる機能の追加も充分可能であることから、高い汎用性あるいは実用性が期待される。

3. 実橋振動実験

前述のとおり、本システムの性能確認のため実橋において振動測定実験を行った。実験対象の橋梁は、札幌市内に架かる支間長 35.6m の歩道橋であり、人力加振によって減衰自由振動を計測した。測定方法は、歩道橋の支間を 6 分割して 1/6～5/6 点に加速度ピックアップを配置し、動ひずみ計を介して本システムにデータを入力する。なお、サンプリング周波数は 1000Hz、データ点数は各 Ch 毎に 16384 個を用いた。

図-2 は支間 1/4 点で加振した場合の 1/6 点、1/2 点および 5/6 点における応答加速度波形である。この波形に対して、パワースペクトルならびに 1/6 点に対する 1/2 点と 5/6 点のコヒーレンスを求めたものを、それぞれ図-3 ならびに図-4 に示す。これらの図に着目すると、2.2Hz においてはコヒーレンスがほぼ 1.0、位相角は 0 度となっており、1 次振動モードであることがわかる。また、7.5Hz の応答については、5/6 点のコヒーレンスが 1.0 および位相角が 180 度であることから、2 次振動が大きく励起されたことが容易に理解できる。同様に 15.0Hz の 3 次モードも、コヒーレンスと位相角によってモード形状

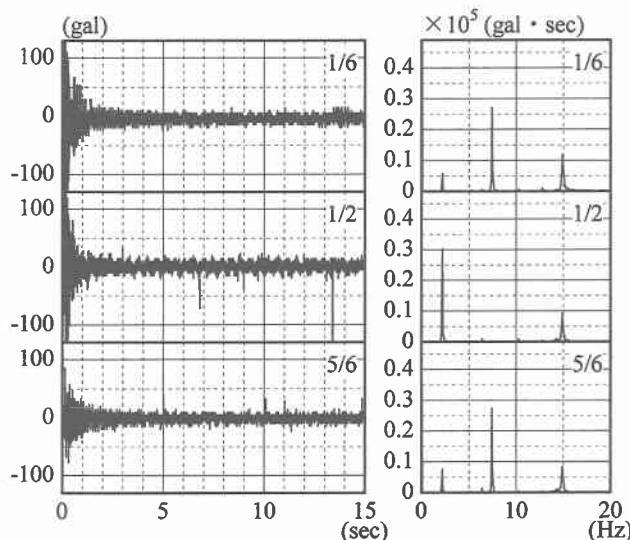
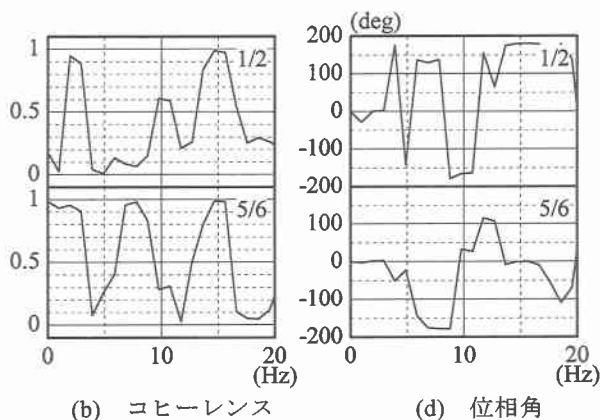


図-2 加速度波形

図-3 パワースペクトル



(b) コヒーレンス

(d) 位相角

図-4 位相角とコヒーレンス

まで確認できる。これらの解析は、実験中に順次行うことが可能なため、計測を進めながら対象となる構造物の振動特性を把握することができ、将来のヘルスマonitoring等への適用が十分に期待できる結果であろう。また、図-5のスペクトログラムからは、各測点における振動数成分の卓越状況と、その時間変化が色の濃淡としてわかり易く表示されている。2.2Hzでは1次モード、1/6点と5/6点では7.5Hzで2次モード、さらに15.0Hzでは各測点で3次モードが出現していることが確認できる。また、スペクトログラムの濃淡から2次モードが大きく卓越している。これらの時間経過は3次モードがもっとも短い時間で振動が減衰していることがわかり、1次モードは1/4点での加振であるためスペクトルの強度は小さいものの、より長い時間振動が継続している。このようにスペクトログラムは構造物の振動を時間領域と振動数領域の双方を同時に表せる。これは、例えば歩行者の通過による移動位置と励起される振動の関係や、車両等の走行荷重によるインターラクションの影響を検討する場合に有効であると考えられる。また、維持管理においても、健全時のスペクトログラムと損傷を受けた後のものを比較することにより、その場で定性的判断が行えるものと推定される。

図-6は以上の検討結果に基づいて各振動モードをIIR型楕円フィルタによって抽出したものである。1次モードについては1/2点の抽出結果であり、2次、3次モードは1/6点の結果である。それぞれの振動モードの抽出結果は図-5のスペクトログラムと一致した傾向を有していることが確認できる。また、減衰定数に関しては、フィルタリング後の波形から直接求めた場合、パワースペクトルに直接1/2法を適用したもの、ならびにWelch法によってスペクトルの推定を行った上で1/2法で求めた結果を表-1に示す。波形から求めた減衰定数と1/2法を適用した場合を比較すると、2次モードと3次モードでは両者はよく一致しており、本研究の解析は妥当であると考えられる。1/2法については、1次モードの減衰定数が波形から得られた結果より大きな値となっている。これは1次モードの振幅が比較的小さく、また計測時間である16.38secのデータ全体に対してスペクトルの算出を行ったため、相対的にノイズの影響が増大し誤差が大きくなったものであろう。一般にこの手法は不規則振動等に適用される性格のものであるため、得られた振動応答によって、その有効性が左右されるものと思われる。本システムでは、各手法を解析段階で用意に切り替えることができるため、随時適切な手法を選択することで解析結果の信頼性を向上させることはもとより、計測の効率も大幅に向上させることができると考えられる。

以上の結果から、本研究のシステムは社会基盤施設の振動測定・解析に対して十分な適用性あるいは有効性を有するものと判断され、維持管理を念頭においたヘルスマonitoringへの応用の可能性も十分に期待できるであろう。加えて、前にも述べたとおり今回構築したシステムはDAQカードやサウンドカードのみならず、TCP/IP等を用いてインターネット回線を通じたデータ取得も可能である。現在、著者らの一部においてはMATLABを

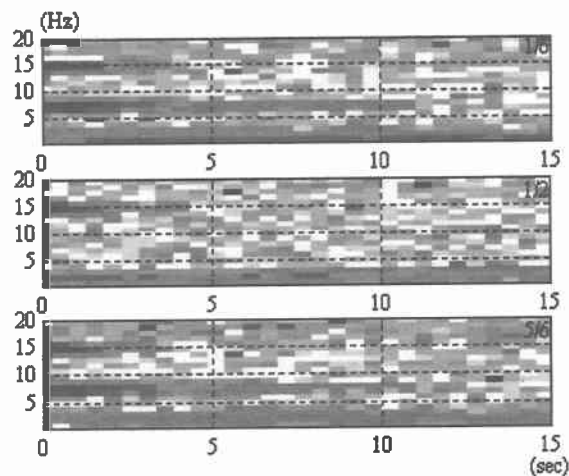
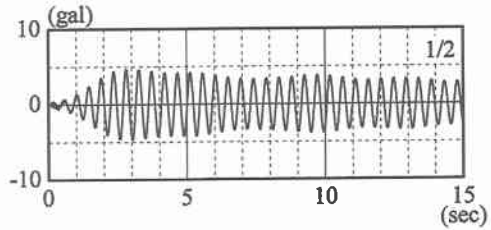
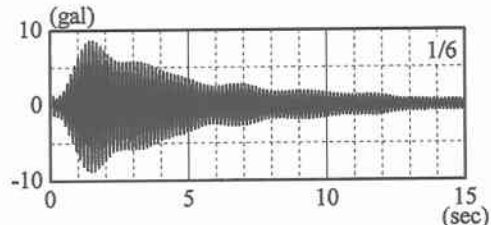


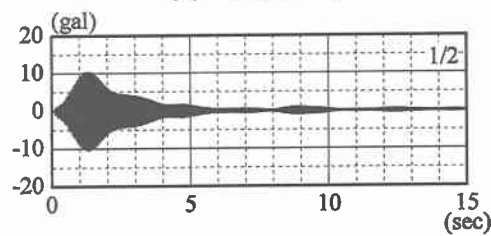
図-5 スペクトログラム



(a) 1次モード



(b) 2次モード



(c) 3次モード

図-6 フィルタリング波形

表-1 減衰定数

	波形	1/2 法	
		フーリエ	Welch
1次 (1/2 点)	0.0026	0.0234	0.0263
2次 (1/6 点)	0.0054	0.0054	0.0057
3次 (1/6 点)	0.0063	0.0066	0.0062

用いた実時間遠隔変位計測^{14~16)}を行っており、これらの技術を統合すれば構造物の常時モニタリングやインテリジェント化にも対応できるシステムの開発も行えるものと推定される。

4. おわりに

以上のように、本研究は社会基盤構造物の振動モニタリングを、特別な専門知識を要せずに実現できるような

統合的な振動計測・解析システムの開発を試みた。本システムの具体的な構成は、ノート型 PC に実装された MATLAB を測定・解析エンジンとして、振動・音響データを直接取得し、フィルタリングによるノイズの除去、スペクトルを用いた卓越振動数の把握から減衰定数の算出ならびに卓越モードの確認等を行えるモジュールを GUI で統合したものである。

実橋振動実験からは、本システムはデータの取得から振動モードや減衰定数をはじめとする構造物の振動特性の把握まで、現場において即座に把握することが可能であることが判明した、また、スペクトログラムの応用から、走行車両のインターアクションの影響、あるいは維持管理等への適用も期待できるものと思われる。

以上の結果から、本研究のシステムは社会基盤施設の振動測定・解析に対して、極めて高い適用性、実用性を有するものと判断でき、ヘルスマニタリングへ応用することも十分可能であると考えられる。さらに、インターネット回線を利用したデータ取得を実現し、構造制御装置あるいは構造同定アルゴリズムなどを組み合わせることにより、合理的な橋梁管理システムの構築や橋梁構造物のインテリジェント化にも寄与できると推定される。

【参考文献】

- 1) 西川和廣：道路橋の寿命と維持管理、土木学会論文集、No.501/I-29, pp.1-10, 1994.
- 2) 大島俊之編：橋梁振動モニタリングのガイドライン、土木学会, 2000.
- 3) 加藤雅史, 高木保志, 島田静雄：PC 橋梁の破壊に伴う振動性状の変化に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.341, pp.113-118, 1984.
- 4) Kato, M. and Shimada, S. : Vibration of PC Bridge during Failure Process, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.112, No7, pp1692-1703, 1986
- 5) 山崎智之, 大島俊之, 大西功基, 三上修一：局部振動による鋼材接合部の損傷評価に関する研究, 応用力学論文集, Vol.5, pp.837-846, 2002.
- 6) 阿部雅人, 藤野陽三, 長山智則, Hong Vu-Manh : 振動計測に基づく非比例減衰系の非反復損傷同定法, 応用力学論文集, Vol.5, pp.855-862, 2002.
- 7) 小幡卓司, 植田康平, 林川俊郎, 佐藤浩一：1/f ノイズ特性に基づいた鋼橋の損傷同定に関する研究, 鋼構造年次論文報告集, 第 9 巻, pp.569-574, 2001.
- 8) 小幡卓司, 植田康平, 宮森保紀, 林川俊郎, 佐藤浩一：鋼橋の損傷同定における音響モニタリングの適用に関する基礎的研究, 応用力学論文集, Vol.5, pp.827-836, 2002.
- 9) The Math Works Inc. : MATLAB Data Acquisition Toolbox User's Guide, サイバネットシステム株式会社, 2001.
- 10) 中村尚五：ビギナーズデジタルフィルタ, 東京電機大学出版局, 1989.
- 11) The Math Works Inc.: System Identification Toolbox User's Guide, サイバネットシステム株式会社, 1999.
- 12) 吉井貞照：デジタル音声処理, 東海大学出版会, 1985.
- 13) 橋梁振動研究会編：橋梁振動の計測と解析、技報堂出版, 1993.
- 14) 安達一憲、宮森保紀、小幡卓司、林川俊郎、佐藤浩一：非接触変位計測システムへの家庭用 DV カメラの応用について、土木学会北海道支部論文報告集、第 58 号、pp.200-203, 2002.
- 15) 安達一憲、宮森保紀、小幡卓司、林川俊郎、佐藤浩一：非接触変位計測システムへの家庭用 CCD カメラの適用に関する一考察、土木学会第 57 回年次学術講演会、pp.1143-1144, 2002.
- 16) 安達一憲、宮森保紀、小幡卓司、林川俊郎、佐藤浩一：PC カメラを用いた実時間遠隔変位計測システムについて、土木学会北海道支部論文報告集、第 59 号、2002. (印刷中)