

トルコ共和国のボスポラス大橋振動モニタリングシステムの開発

Bridge Behavior Monitoring System at First Bosphorus Bridge

川浦 淳一⁽¹⁾
Junichi KAWAURA

抄 録

新日本製鐵エレクトロニクス・情報通信事業部の科学公共系システム開発の事例として、トルコ共和国に設置された橋梁の振動モニタリングシステムを報告した。このシステムは、気候要因あるいは地震等によって励振された橋梁の振動状況を、統計、時間領域、周波数領域の解析機能を通して多面的に把握するための様々な機能を有している。

Abstract

As an example of scientific and public systems developed by the Electronics / Communication Information Business Dept. of Nippon Steel, the bridge behavior monitoring system is reported in this paper, which was installed in Bosphorus Bridge in the Republic of Turkey. This system has a variety of functions for seizing many-facetedly the vibrating state of the bridge excited by climate factors, earth quakes and so, through those analyzing functions of statistics, time domain and frequency domain.

1. 緒 言

新日本製鐵エレクトロニクス・情報通信事業部では、システムインテグレーション事業の一つのターゲットとして、科学技術分野の実験・解析系システムを手がけている。その一例として、1996年度に受注、開発した橋梁の振動解析システムについて報告する。このシステムは、政府間技術協力(ODA)の対象として、(特)国際協力事業団(JICA)が企画し、トルコ共和国に技術協力機材供与されたものである。新日本製鐵では、システムのハードウェア調達、ソフトウェア開発、及び現地への据付指導を担当した。開発は1996年4月に開始、半年後の9月末に完了した。据付指導は、1997年の6月にイスタンブールで実施した。

2. 本システムの開発目的

トルコ共和国は、マルマラ海と黒海をつなぐボスポラス海峡によって、西のヨーロッパ側地域と、東のアジア側地域に国土が分割されている。観光で有名なトルコ最大の都市イスタンブールは、商業地域の大部分がヨーロッパ側にあり、住宅地域がアジア側にあるため、特に朝夕の通勤時間帯にはボスポラス海峡を越えて多くの人が移動することになる。このような海峡を越えた交通、物流のた

め、ボスポラス海峡には各国の協力によって、第一及び第二ボスポラス大橋が架けられている。

二つの大橋のうち、第一ボスポラス大橋には、橋の保全や災害防止のため、日本からの技術協力により各種のセンサーと信号伝送・記録設備が取り付けられている。センサーとしては、風向、風速、気温等の気候条件に関するものと、加速度計、地震計、変位計等の力学系のもので設置されており(表1参照)、合計で29チャンネルの信号がデジタル伝送装置を介してアジア側に置かれた橋梁管理事務所まで引き込まれている。事務所内の記録設備は、任意の信号をデジタルテープに記録し、またペンレコーダに出力する機能を有しており、更に地震や強風の観測時にはテープ記録を自動開始する機能を持っている。しかしながら、計測したデータを計算機可読なメディアに出力する機能が無いために、地震時等の貴重な計測データを更に高度解析するための手段が無かった。

本システムは、このような既設の計測設備に対して、計測データの電子化、計算機支援による高度な解析等の機能を付加することを目的として導入された(図1参照)。なお、本システムの解析機能等に関する基本的仕様は、日本の橋梁専門家が本州四橋連絡橋等の例を参考にして設計したものである。

⁽¹⁾ エレクトロニクス・情報通信事業部
産業システムソリューション第三部 マネジャー

東京都渋谷区代々木3-25-3 大東京火災新宿ビル
〒151-8527 ☎(03)5352-9348

表1 計測データ一覧

計測カテゴリー	計測項目	チャンネル数	設置場所
風向, 風速	風向	1	橋塔頂
	風速	1	
変位	光学式変位計 (Z, Y)	2	橋桁中央
	機械式変位計 (X)	1	塔～桁間 (北)
	機械式変位計 (X)	1	塔～桁間 (南)
加速度	1成分加速度計 (X, Y)	2	桁中央 (南北中間)
	1成分加速度計 (Z)	1	桁中央 (北)
	1成分加速度計 (Z)	1	桁中央 (南)
	1成分加速度計 (Y)	1	桁1/4 (南北中間)
	1成分加速度計 (Z)	1	桁1/4 (北)
	1成分加速度計 (Z)	1	桁1/4 (南)
	1成分加速度計 (Y)	1	塔頂 (南北中間)
	1成分加速度計 (X)	1	塔頂 (北)
	1成分加速度計 (X)	1	塔頂 (南)
地震加速度	地震計 (X, Y, Z)	3	ヨーロッパ側アンカレイジ
	地震計 (X, Y, Z)	3	ヨーロッパ側塔基礎
	地震計 (X, Y, Z)	3	アジア側塔基礎
	地震計 (X, Y, Z)	3	アジア側アンカレイジ
外気温度	外気温度計	1	事務所側

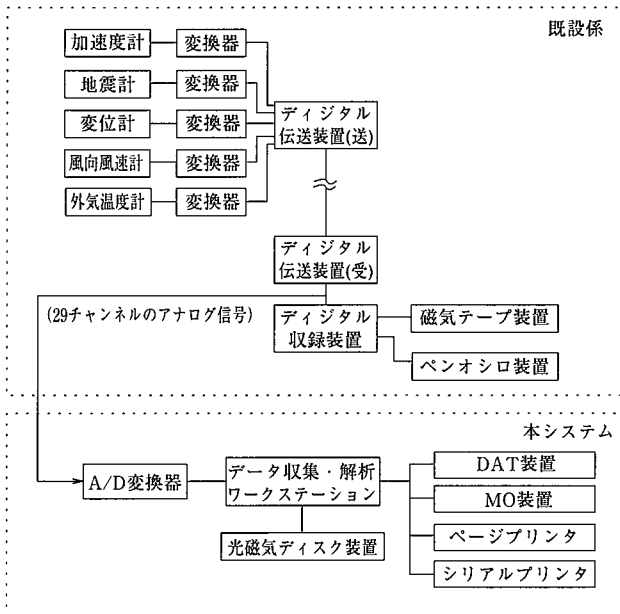


図1 既設系及び本システムの構成

3. 本システムの概要

3.1 システムハードウェア構成

本システムは、下記の装置群から構成される。(図1参照)

(1) データ収集・解析用ワークステーション

システム全体の制御、計測データの収集、即時解析、その他の解析を行う。機種は、ヒューレットパッカード社のHP9000モデル735であり、OSは同社のHP-UXを搭載している。

(2) データ入力装置

計測データのA/D変換を行い、データ収集・解析用ワークステーションに入力する。機種はPAVEC社のDF-3023ASであり、計測チャンネル数32チャンネル、量子化ビット数14ビットである。本システムでは、基本サンプリングレートは25.6Hzとし、16倍オーバーサンプリング(409.6Hz)したうえで、ソフトウェアによるデジタルローパスフィルタ及び16分の1ダウンサンプリングを実行すること

でS/Nを向上させている。

(3) 電源装置

トルコ国仕様の電源電圧(単相220V)を日本仕様の電源電圧(単相100V)に降圧するとともに、電源障害時にも安定した電源を供給するためのUPS機能を有する。UPS機能は、停電状態になっても全機器を30分以上稼働できる大容量バッテリーを有している。

(4) ページプリンタ

解析結果の印字に利用するため、レーザープリンタを用意している。ページ記述言語を用いており、グラフ等の出力も可能である。

(5) シリアルプリンタ

単位時間毎に各種統計計算結果を自動的に帳票出力するため、ドットインパクト型のシリアルプリンタを用意している。

(6) 光磁気ディスク装置

計測データを短期保存するため、5インチ型の光磁気ディスク装置を用意している。ディスク1枚あたり1.3GBの容量を持つ。

(7) テープ(DAT)装置

計測データを長期保存するため、デジタルオーディオテープドライブ装置を用意している。テープは比較的安価であり、1本当たり2GBの容量を持つ。

3.2 システムソフトウェア構成

本システムのデータ収集・解析用ワークステーションには以下の3種類のソフトウェアが搭載されている(図2参照)。

(1) データ収集アプリケーション

データ収集アプリケーションソフトウェアは、全32チャンネルの信号を連続的にサンプリングし、センサー毎の校正演算を施したうえで、単位時間(10分間)毎に各種統計計算を実施して、シリアルプリンタに計算結果を印字する。また、毎時1単位(10分間)分の計測データについては、データそのものを磁気ディスクに保存する。更に、設定されたしきい値を超える振動加速度、あるいは風速が観測された場合にも、データを磁気ディスクに保存する。

データ収集アプリケーションソフトウェアは、常駐型プログラムとして実装されており、データ収集・解析用ワークステーションの起動とともに自動的に実行開始する。

(2) データ解析アプリケーション

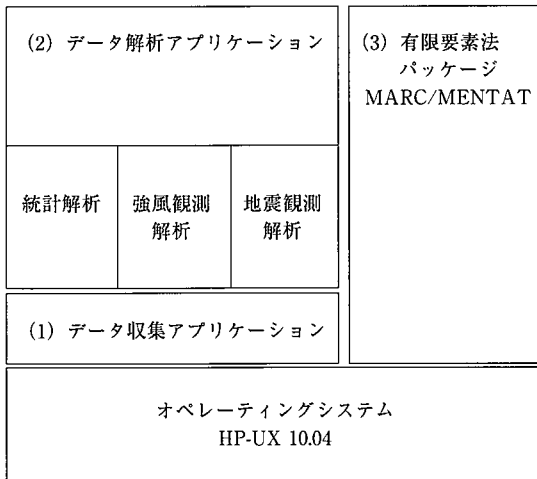


図2 ソフトウェア構成図

データ解析アプリケーションソフトウェアは、データ収集アプリケーションソフトウェアによって保存された計測データに対して各種の専門的解析を行い、表示、印字するソフトウェアである。また、本システムの動作に関する様々な設定や制御を行う機能、計測中のデータをリアルタイム表示する機能も有する。

データ解析アプリケーションソフトウェアは、ごく標準的なGUI (Grafical User Interface) プログラムとして実装されており、全ての機能を簡単なメニューインタフェースを介して実行することができる。

(3)有限要素法解析パッケージ

橋梁の高度な力学的解析を支援するために、MARC社のMARC/MENTAT有限要素法解析ソフトウェアが搭載されている。橋梁の数値モデルに対し、実測した加振波形を加えて動的シミュレーション

を実施する等のことが可能となる。

3.3 解析機能の概要

本システムのデータ解析アプリケーションソフトウェアには、以下のような解析機能が実装されている。

3.3.1 即時解析機能

単位時間(10分間)毎の計測データに関し、チャンネル毎の平均値、標準偏差や、加速度パワースペクトルの卓越振動数等を算出し、帳票出力する。通常時に橋梁の状態を監視するための第一の手段となる。

3.3.2 統計解析機能

単位時間毎の計測データは下記のいずれかの条件を満たす場合のみディスクに保存される。

- ・計測時刻が毎時50分開始の場合
- ・設定したしきい値以上の瞬時風速が観測された場合
- ・設定したしきい値以上の瞬時地震加速度が観測された場合
- ・ユーザが保存指示した場合

これらのいずれの条件により保存されたデータに対しても、下記のような統計解析を実施することができる。

- ・風、変位、加速度に関する統計量日報
- ・風向、風速に関する配位図(図3参照)
- ・風速、気温と、橋桁の変位との相関図(図4参照)

これらの統計解析機能を用いて、気温変化による橋桁や橋塔の伸縮変化や、風力による橋桁の変位等の橋梁の動態を定量的かつ経時的に把握することが可能となる。

3.3.3 強風時解析機能

前述の計測データ保存理由のうち、特に強風時に観測、保存されたデータのみについて、特別な解析を行う機能を有する。

- ・時系列表示

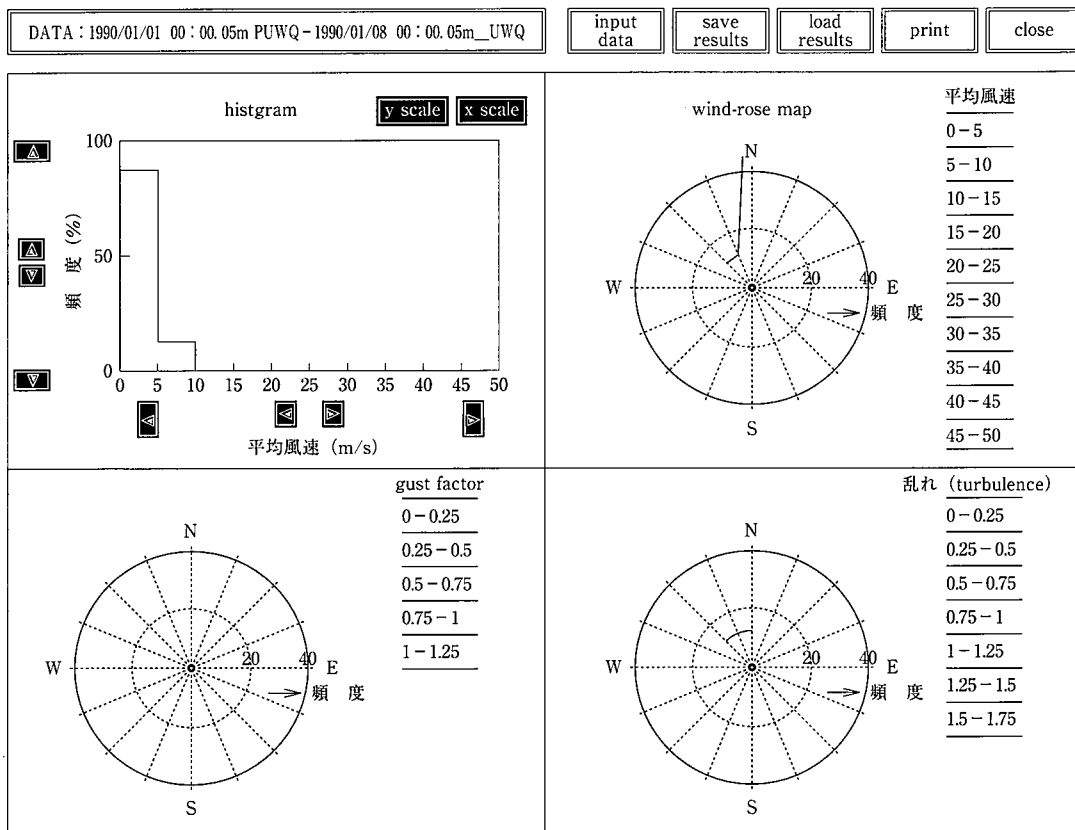


図3 配位図画面(例)

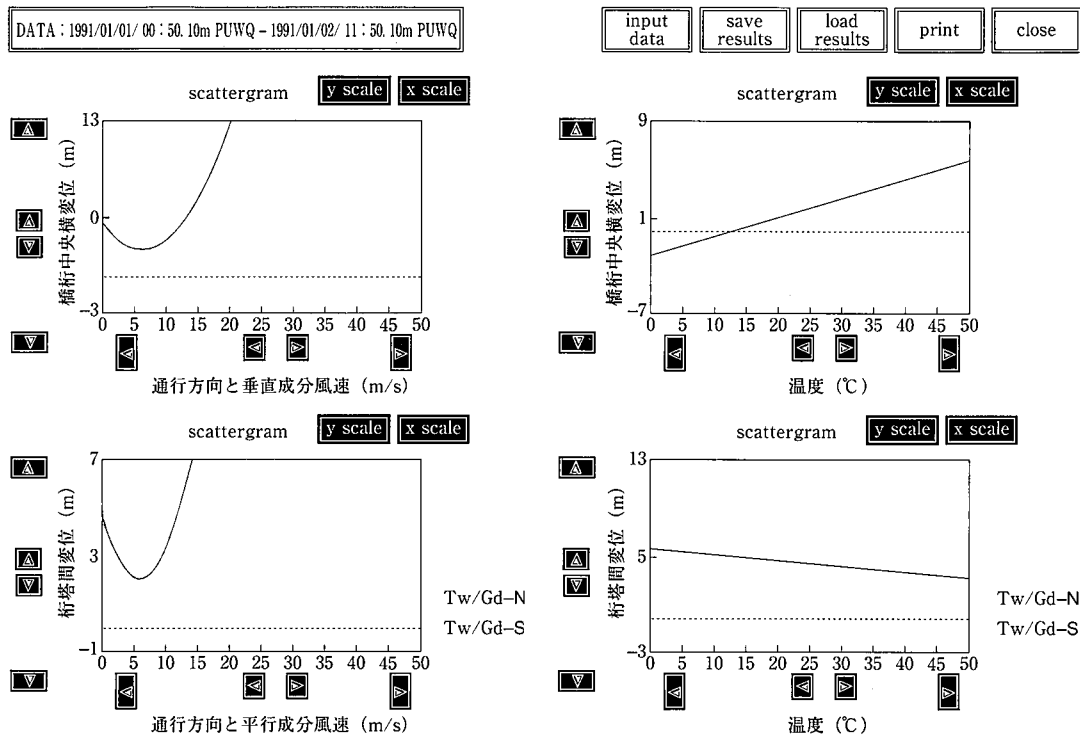


図4 統計解析画面(例)

- ・パワースペクトル解析
- ・簡易共通モード解析(図5参照)
- ・相関解析

これらの特別な解析機能により、強い風によって加振された橋梁の振る舞い、特に橋桁の固有振動モード毎の励振の状況等が定量的かつ多面的に把握できる。

3.3.4 地震時解析機能

強風時解析と同様に、特に地震時に観測、保存されたデータのみについて、特別な解析を行う機能を有する。

- ・時系列表示
- ・パワースペクトル解析
- ・最大加速度発生時刻の検出

これらの特別な解析機能により、地震によって加振された橋梁の振る舞いが定量的に把握できる。

3.3.5 データ管理機能

磁気ディスク上に保存される計測データは、単位時間(10分間)あたりの全(32)チャンネル分の校正済み計測信号が単精度浮動小数点形式で1ファイルに格納される。日々の運用を続けるうちに、磁気ディスク上に多数のファイルが蓄積される。このファイルの管理を行うための機能が用意されている。

データ管理機能では、ディスクと光磁気ディスク、あるいはディスクとDATテープとの間でのファイルの双方向移動(あるいはコピー)、及びファイルの削除を容易に実行することができる。

4. 本システムの特徴

本システムには、橋梁の動態観測・解析に特化した特徴的な機能が盛り込まれている。以下に、その代表的なものについて紹介する。

4.1 リアルタイム計測機能

データ収集アプリケーションの動作中に、収集中の計測データをメモリから読み出し、画面上に任意の6チャンネルをリアルタイム表示することができる(図6参照)。メモリ上には、現在収集中の

データと直前の10分間のデータが残っており、画面上では現在収集中のデータが10分前のデータを刻々と書き替えていく様に(オシロスコープ的に)表示される。このリアルタイム表示機能により、各センサー系のヘルスチェックを行うことができる。

4.2 SDOF(Single Degree Of Freedom)カーブフィット機能

データ解析アプリケーションソフトウェアには、計測、保存された時系列信号のパワースペクトルを求める機能がある。このパワースペクトル上で、任意のスペクトルピークの近傍を範囲選択することで、指定された周波数範囲において最小自乗規範下で適合する1自由度系のパワースペクトル(白色雑音で励振された1自由度系の加速度パワースペクトル)を導き、その係数より固有振動数と減衰比を同定する機能を持つ(図7参照)。

4.3 簡易モード解析機能

橋桁の各所に取り付けられている加速度センサーの信号を利用し、鉛直及び水平(橋桁直交方向)の振動モード姿態を求める機能がある。ただし、正確な加振力を求めることができないため、以下のような簡易的な方法によって擬似的な振動姿態を求めている(図5参照)。

- ・等間隔で取り付けられている各加速度センサー毎の複素パワースペクトルを求める。
- ・ユーザがスペクトルピーク近傍を範囲選択する。
- ・SDOFカーブフィット機能によって固有振動数を算出する。
- ・各センサー毎に、固有振動数における複素パワースペクトル値を求め、1点を参照点とし、他点ではスペクトル比を算出する。
- ・画面上に、センサー位置毎に、複素スペクトル比の実数部に比例したデフォルメーションを与えて変位した橋桁を描く。

4.4 デジタルフィルタ機能

橋梁に取り付けられている振動系センサーには、変位系、加速度系が混在しているため、演算処理の上で加速度信号を変位信号に変換しなければならない場合がある。その際、単純に数値積分を実施しても加速度計のノイズやオフセットのために積分結果が発散して

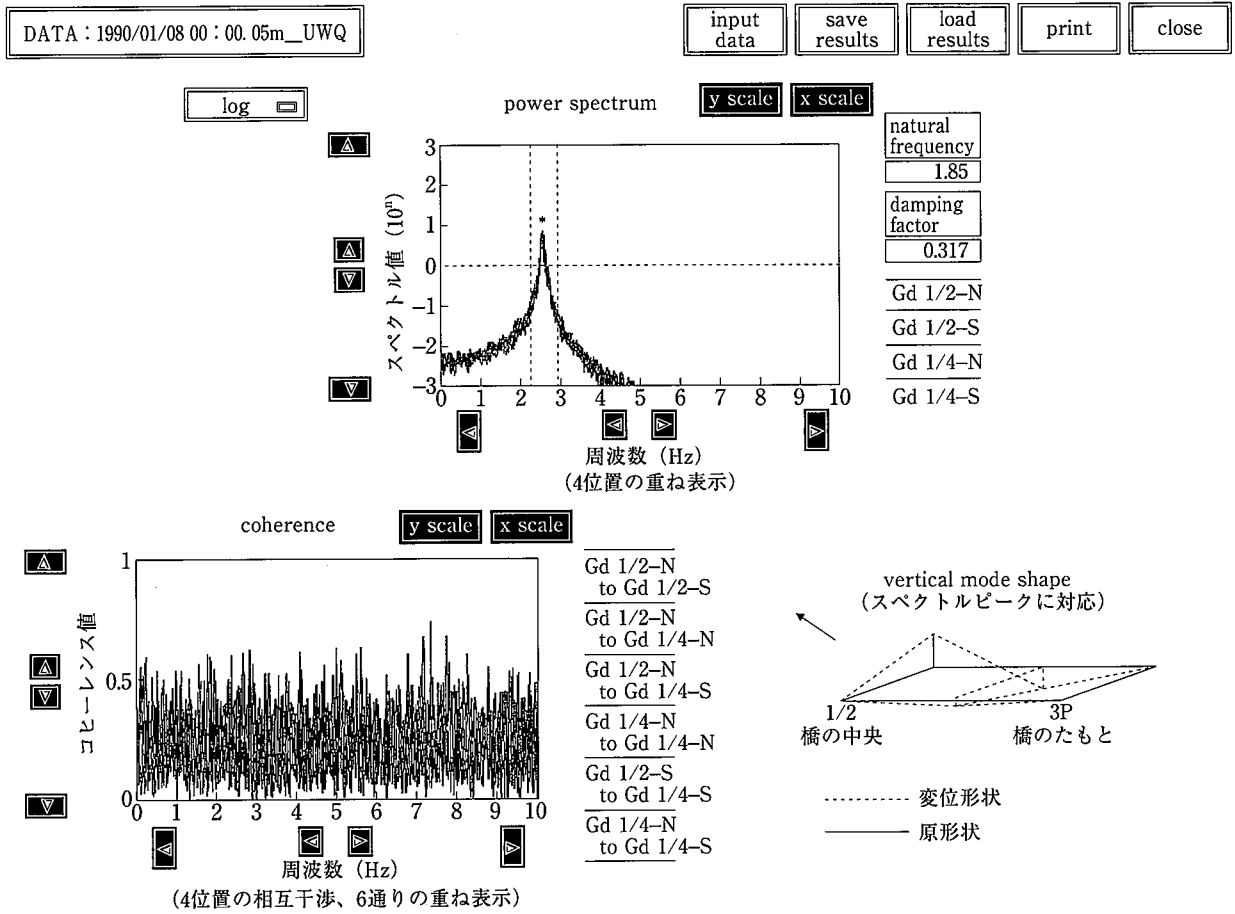


図5 共通モード解析画面(例)

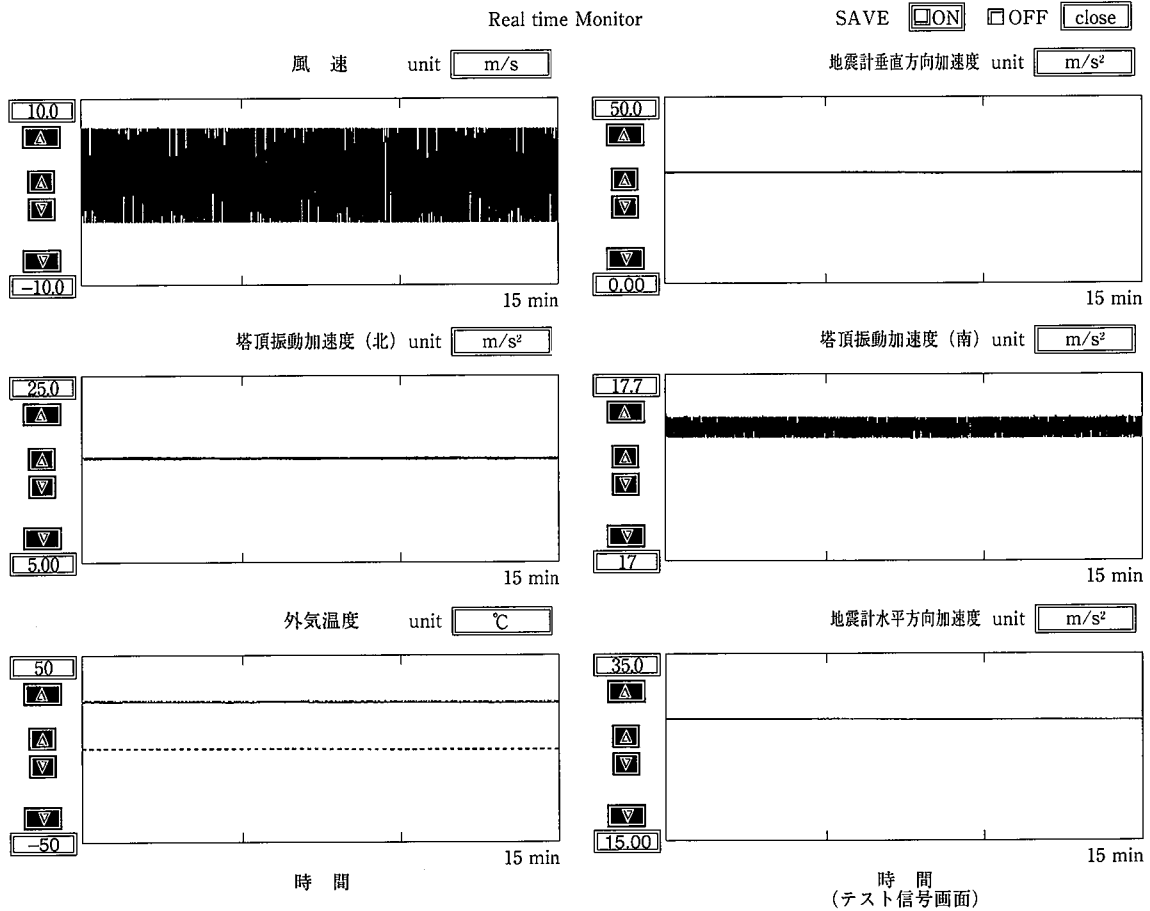


図6 リアルタイムモニター画面

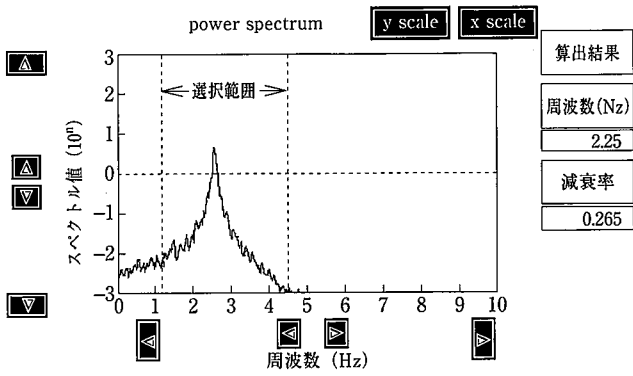


図7 SDOFカーブフィット機能(例)

しまい、大抵は満足の結果が得られない。そのため、本システムにはデジタルバンドパスフィルタ付きの数値積分機能が備えられている。オフセットを除去するために低域を遮断し、またノイズを除去するために高域を遮断することで、安定した数値積分を実施することができる。

5. 結 言

トルコ共和国の第一ボスボラス大橋に設置された橋梁振動モニタリングシステムの開発事例について報告した。このような高度な機能を持つリアルタイム計測解析システムが橋梁に設置され、振動モニタリングに適用されているケースは世界でもあまり例を見ない。今後、このシステムから橋梁の耐震設計等に役立つデータが得られることを期待している。