

## 移動体通信による橋梁振動の遠隔計測システムの開発

Development of remote measurement system for bridge vibration by mobile communication

河村進一\*, 岡林隆敏\*\*, 高木真一郎\*\*\*

Shin-ichi Kawamura, Takatoshi Okabayashi, Shin-ichiro Takagi

\* 工博 長崎大学助手, 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎市文教町 1 番 14 号)

\*\* 工博 長崎大学教授, 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎市文教町 1 番 14 号)

\*\*\* 工修 (株)日本構造橋梁研究所, 設計第一部設計第三課 (〒107-0062 東京都港区南青山 5 丁目 12 番 4 号)

This study proposes a method for remote measurement for assessment and maintenance of bridges. Three parts with measurement, data communication and analysis divide the remote monitoring system for bridges. In this paper, the basic element of the data communications between the measurement site and monitoring room were improved, by using the Internet and PHS network. From the measurement results, it is confirmed that this system is effective for remote monitoring for bridge vibration.

*Key Words: bridge vibration, remote measurement, mobile communication, Internet, PHS*

キーワード: 橋梁振動, 遠隔計測, 移動体通信, インターネット, PHS

## 1. はじめに

橋梁の振動計測は, 供用前の新設橋梁と供用中の既設橋梁について行われる場合がある。前者の目的は, 設計時に予測した振動特性の確認であり, 後者は, 橋梁の振動や騒音による環境問題や橋梁の維持管理のために行われる。新設橋梁の振動計測は, 所定の振動特性を確認するためであり, 実験は短期間であるが, 供用中の既設橋梁の振動計測は, 振動原因の交通荷重の変動や周辺環境の変動ために, 比較的長期間モニタリングされる場合が多い。橋梁の維持管理に関して行われる計測では, ひずみや変位と共に振動が計測される。近年, 橋梁の健全度評価を橋梁の経常的なひずみ, 変位, 振動等のモニタリングから診断する技術<sup>1)2)</sup>が確立されつつある。

長期的あるいは経常的な橋梁のモニタリングを実現する経済的な側面として, 計測機器の経費と人件費の削減が考えられる。これを実現するためには, 遠隔計測が必要であり, このために, 計測の無人化, 自動化, 実時間計測を実行できる計測システムを構成する必要がある。

振動の遠隔計測は, 検出器(センサー), 信号処理, 信号伝送の各部から構成される。検出器は近年, 光ファイバーや炭素繊維などの新しい振動検出法が開発されている<sup>3)</sup>。パーソナルコンピュータの飛躍的な機能向上と新しいソフトウェアの開発により, 可搬型の高精度な信号処理装置が実現可能になってきた。さらに, インターネットと公衆無線電話の急速な普及により, これまで考えられなかった遠隔の信号転送が実現した<sup>4)</sup>。振動遠隔計測の技

術革新は急速な勢いで進展しており, このような技術は数年後には, 日常的な環境になるものと思われる。

21世紀を間近に控え, 戦後, 建設してきた膨大な土木構造物を有効に活用し寿命を延ばすための維持・管理が次世代の緊急かつ重要な課題になってきた<sup>5)</sup>。一方, コンピュータを含む電子機器の小型化と飛躍的な発達, さらに携帯電話を初めとした移動体通信による, 遠隔無線技術の長足の進歩と大量生産による激的な低価格化により, 低価格の遠隔無線計測の可能性が開けてきた。

著者らは, 道路橋振動計測においてこれまで可搬型の計測器とシステム同定技術を組み込んだ高機能可搬型振動計測システムを開発してきた<sup>9)10)</sup>。本研究は, 橋梁維持管理のための橋梁振動の遠隔無人計測を目的として, これまで開発してきた振動計測システムを遠隔無人操作するために, 基礎的な要素技術の改善を行ったものである。

本論文では, 遠隔計測システムを構成するために, 計測部とモニター部をインターネットの通信方式であるTCP/IP 接続しデータ通信を行う方法を提案した。通信のプログラムと画面の設計は, 計測専用のプログラム言語(LabVIEW)を用いた。

本研究では, 電話回線で接続された遠隔地における構造物の振動データを転送する場合と, 電話線のない橋梁においてPHSを用いて無線でデータ転送する実験を行った。構造物や橋梁振動におけるデータ転送システム構成におけるシステムの構成方法と, 計測実験から得られた結果を述べる。

2. 道路橋振動遠隔計測の要素技術

2.1 モバイル計測技術

今後、橋梁に関わる計測技術は、情報化施行による施工時の計測、完成時の静的・動的性能確認試験、維持管理のための経常的な計測など、計測機材の低価格化と計測業務の低価格化が進めば、各種の計測が日常的に行われるようになることが予想される。また、将来の構造物として適応型構造物、スマートストラクチャーが研究されており、常時計測を前提とした構造物を開発することが考えられている。このような橋梁の維持管理に関する計測や適応型構造物・スマートストラクチャーの実現では、遠隔計測や計測システムの低価格化が重要な技術的課題となっている。

振動遠隔計測の現場では、コンピュータの電源が無くかつ遠隔操作で駆動する環境を考える必要がある。電源には、太陽電池が利用可能になってきた。さらに、遠隔操作には、パーソナルコンピュータの遠隔操作作用のソフトウェアやTCP/IP 通信による遠隔操作が可能である。このように、測定データの高度な処理と共に遠隔データ転送が、パーソナルコンピュータにより実現できる環境が整いつつある。

ここでは、振動遠隔計測の基礎となる検出器、信号処理、信号伝送の技術について述べる。

2.2 検出器(センサー)

構造物の計測には、ひずみゲージ、変位計、加速時計のような、従来の検出器が用いられる。近年、次世代の知的構造物(Smart Structure, Intelligent Structure)のために、光ファイバーや炭素繊維を使用したセンサーが開発されている<sup>12)</sup>。新しい考え方の検出器は、構造物の維持管理のために構造物の健全度を評価する検出器として実用化が進められている。

2.3 信号処理

振動実験の現場では、振動計測から得られた信号から構造物の振動特性(振動数、減衰定数、振動モード)を推定する。近年、モード解析法の理論により高い精度の振動特性の推定が可能になった。また、パーソナルコンピュータの飛躍的な発達や、A/D コンバータなどのインターフェイスボードの低価格化により、現在では、高精度の可搬型振動特性推定システムが実現されている。

構造物から発生する信号、すなわち、ひずみ、変位、加速度等の高速な測定と、コンピュータによる高精度な特性推定により、近年、構造物の健全度評価が可能になりつつある。

2.4 信号伝送

大規模構造物の専用線によるモニタリングはすでに行われている。さらに、専用の無線による、無人化施工も実現している<sup>13)</sup>。今後、振動の遠隔計測に重大な影響を及ぼす技術は、公衆電話回線によるデジタル通信と移動体無線通信の爆発的な普及である。従来の専用線あるいは専用無線による計測では、設備投資に膨大な経費がかかり、特殊な長大構造物以外はモニタリングの対象にならなかつ

た。

近年の公衆電話回線のデジタル通信と移動体無線通信の普及は、通信施設を独自に準備することなく、回線使用料のみで信号伝送をすることを可能にした。現在、観測データを実時間で十分余裕をもってモニタリングできる環境にはないが、近い将来、高速通信の実現の可能性がある。また、移動体無線通信は、通信可能範囲の制約はあるが、計測現場と観測基地の自由な移動を可能にし、高速道路などの振動計測に飛躍的な技術革新を起すことが考えられる。さらに、インターネットの活用は、公衆回線使用料の劇的な低下を実現する可能性をもっている。

3. 実時間遠隔モニタリングシステムの開発

3.1 システムの概要

橋梁振動を遠隔地でモニタリングするには、計測されたデータを遠隔地に送信するために、何らかの手段によって、計測現場とモニター側との間で通信することが必要となる。

著者らは、すでに橋梁現場での計測から動特性推定までの一連の処理を1台のノート型パソコンに集約した、可搬型動特性推定システムを開発している<sup>9)10)</sup>。本論文で開発する実時間遠隔モニタリングシステムは、可搬型動特性推定システムをもとに、通信手段としてTCP/IP を利用したデータ転送プログラムを追加している。

以下の節では、本論文で採用した通信手段であるTCP/IP と、それを利用したデータ転送プログラムおよび計測現場におけるTCP/IP 接続の方法について説明する。

3.2 TCP/IP の機能

狭義のTCP/IP はインターネット接続のためのプロトコルの一部であるTCP (Transmission Control Protocol)とIP (Internet Protocol)のことであるが、一般的には、それらを含めたインターネット上での通信に必要なプロトコル群のことを示す。これらは、図-1に示すように、ネットワーク層、トランスポート層、アプリケーション層の3階層に分けることができる<sup>12)</sup>。

ネットワーク層に位置するプロトコルであるIP は、パケットに分割されたデータを指定されたIP アドレスを持つホストに送信するためのプロトコルである。IP は、上位層のTCP からパケットに分割されたデータを受け取り、各パケットに通信相手先のアドレス等を含むIP ヘッダを付加して下位層にパケットを渡し、イーサネットや電話

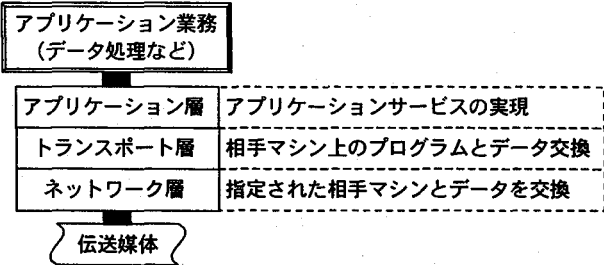


図-1 TCP/IP の各層の働き

回線などの通信媒体を通じて送信する。

トランスポート層のプロトコルで、一般的に使用されるのが TCP である。TCP とは、2つのノード上のアプリケーション間で信頼性のある通信を行なうために、通信する機器間でコネクションの確立を行った上で、データをパケットに分割し、パケットの順番等の情報を含む TCP ヘッダを付加して、下位層の IP に受け渡すものである。TCP による通信では、IP 層やその下位の物理的な媒体の特性から生じるデータの抜け落ち、重複、順番の誤りなどの影響を排除することができる。

現在、インターネット上で一般的に用いられている WWW や電子メールなどは、アプリケーション層のプロトコルを利用して実現されている。

3.3 データ転送プログラムと計測システムへの組み込み

作成したデータ転送プログラムについて説明する。このプログラムは、図-1のトランスポート層に位置する TCP を利用したサーバー・クライアント型プログラムであり、信頼性の高いデータ転送を実現している。本論文で開発したシステムでは、計測側がサーバーになり、モニター側がクライアントとなる。

可搬型動特性推定システムの開発に使用した仮想計測器ソフトウェア LabVIEW には、ネットワークプロトコルである TCP/IP を利用して、データ通信を行うためのプログラム群が用意されている<sup>13)</sup>。これらを利用して、データ転送プログラムを作成し、可搬型動特性推定システムに組み込むことで、遠隔計測システムを開発した。

計測を行うには、まずサーバー側で、チャンネル数、サンプリング間隔、データ通信に使用する TCP ポート番号等のパラメータを設定し、サーバープログラムを起動しておく。次に、クライアント側で受信プログラムを起動し、サーバーの IP アドレスと使用するポート番号を指定してコネクションを確立する。この状態で、クライアントからサーバーに対して、計測を実行・停止するように指示することができるようになる。

図-2にデータ通信におけるサーバーとクライアントとの間のデータ処理の流れを示す。サーバーで計測されたデータは、TCP 接続に書き込む。ここで、計測した二次元配列に記憶されているデータを効率よく送信するために、サーバー側で、一次元配列に変換し、データサイズとともに送信する。

クライアントでは、送信された一次元データとデータサイズを読み込み、二次元配列データに復元して、図-3に示すようにモニター上に時系列波形とパワースペクトルを表示し、ハードディスクに計測データを保存する。表示された波形を確認した後、クライアントから計測終了要求をサーバーに送ることで、計測が終了する。

図-4に開発した遠隔計測システムのサーバーを示している。本システムは、電池駆動の加速度計および増幅器と最大8チャンネルの A/D 変換が可能な PCMCIA カード型の計測ボード、通信を行うための通信カードを内蔵したノート型パソコンで構成される。

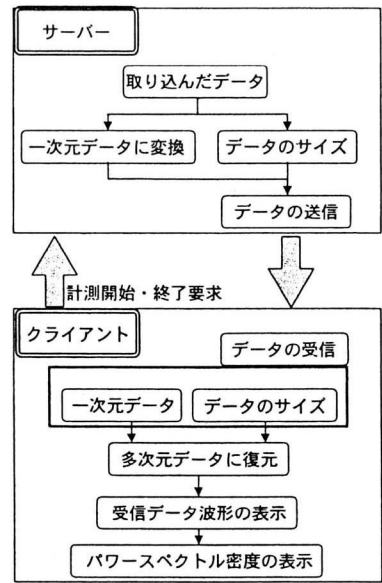


図-2 データ転送プログラムの流れ

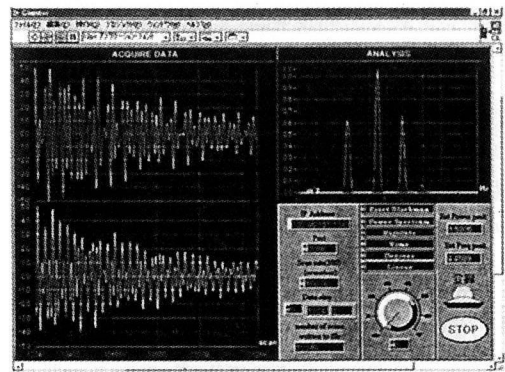


図-3 パネル画面

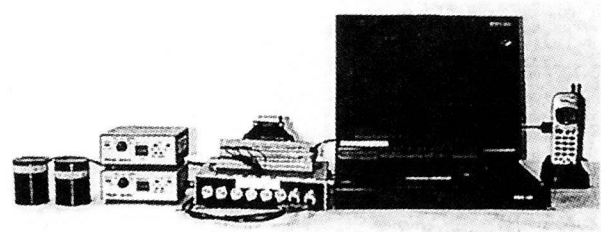


図-4 遠隔計測システム

サンプリング周波数 100Hz で計測を行う場合、必要なデータ転送速度は、約 25kbps となる。サーバー・クライアント間のネットワーク上のボトルネックが、それ以上の転送速度を持っていれば、ほぼ実時間での遠隔計測が可能となる。

3.4 TCP/IP 接続の方法

本論文においては、サーバー・クライアント間が有線接続、すなわち、電話回線で常時接続された遠隔地における構造物の振動データを転送する場合と、無線でデータ転送する場合について実験を行った。

### (1) 有線接続システムの構成

有線接続システムでは可搬型動特性推定システムに LAN カードを搭載したものをサーバーとし、インターネットに接続されたパーソナルコンピュータをクライアントとしている。

### (2) 無線接続システムの構成

無線接続システムでは、現在最も高速なデータ転送速度が期待できる PHS を使用し、PHS 用データ通信カードを組み込んだモバイルコンピュータをサーバーとした。クライアントは、有線接続システムと同様に、インターネットにアクセスできるパーソナルコンピュータを用いた。

計測現場に設置するサーバーとモニター側のクライアントとの間でデータ通信を行うために、インターネットサービスプロバイダに対して、ダイヤルアップ PPP 接続を行う。インターネットサービスプロバイダを利用することで、計測現場とモニターする側との距離が離れていても通信コストを抑えることができる。

### (3) 接続における問題点

TCP/IP によるサーバー・クライアント型のアプリケーションにおいては、クライアントを接続する場合にサーバーの IP アドレスを特定する必要がある。

インターネットに常時接続されている環境では、ネットワーク内に設置されるコンピュータの IP アドレスは固定されているが、ダイヤルアップによる接続では、通常、接続時に IP アドレスが動的に割り当てられる。そのため、計測現場に設置したサーバーからダイヤルアップ接続した後でなければ、サーバーの IP アドレスが特定できず、接続後に何らかの方法でクライアントに通知する必要がある。

現段階では、ハードウェア上の制約から、サーバーから手動でダイヤルアップ接続を行う必要があるため、完全に無人化することはできないが、将来的には、必要に応じて自動的にダイヤルアップし、完全無人計測できるようになる。その場合においても、この IP アドレスの動的割り当てに関する問題が発生すると考えられる。

本論文の実験では、ダイヤルアップ接続を確立した後、Windows98 標準の ipconfig ユーティリティを使用して、サーバーの IP アドレスをファイルに書き込み、電子メールを使用して、クライアント側に通知することで対処した。また、この方法を自動化してサーバープログラムに追加することで、無人計測の場合にも対処できる。

## 4. 有線システム実験

### 4.1 有線システムのネットワーク構成

遠隔計測システムの有効性を確認するために、長崎大学内のネットワーク NUnet と外部のネットワークとの間で計測実験を行った。

本実験において、クライアントは長崎大学の学内 LAN に接続し、サーバー（計測）側として、(株)PAL 構造の一室を借用して模型構造物および有線実時間遠隔計測システムのサーバーを設置した。図-5 にこの実験におけるサーバー・クライアント間のネットワークの経路を示す。

(株)PAL 構造では、OCN エコノミーという ISDN 回線を利用した常時接続サービスでインターネット接続されており、伝送速度は 128kbps である。地理的にはサーバー・クライアント間は 4km ほどの距離であるが、ネットワーク的には、OCN、学術情報センター—民間 ISP ゲートウェイ、学術情報ネットワーク SINET を経由しているため、伝送距離は 2,500km 以上となる。

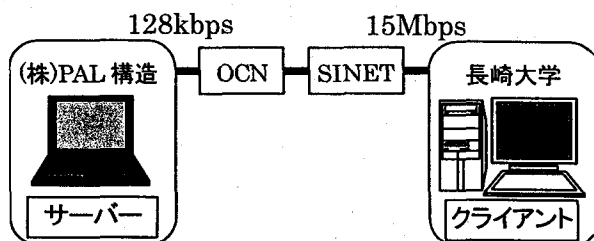


図-5 サーバー・クライアント間のネットワーク経路

### 4.2 模型構造物による有線システム実験

図-6 に示すような 5 層ラーメン模型構造物の各層に加速度計を設置し、1 層目に衝撃加振を加え衝撃加振試験を行った。遠隔計測システムを用いて、サーバーの計測結果とネットワーク経由でクライアントに送信された計測データの両方を保存し、その両者を用いて動特性の推定を行った。なお、サンプリング周波数は 100Hz とし、1024 点 (10.24 秒) のデータを 1 度に転送することとし、計測時間を 40.96 秒以上となるようにした。

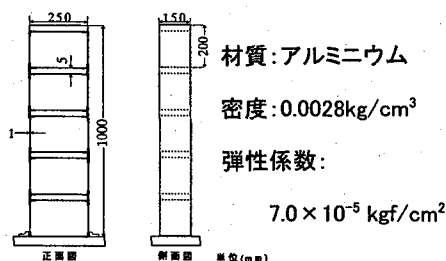


図-6 5 層ラーメン模型

図-7 に 2 層目の加速度のクライアント側での受信波形を示す。計測は約 40 秒間行っているが、本実験で利用した模型では、加速度の減衰が大きいため 10 秒間の結果のみ表示している。この波形から、衝撃加振による振動特性推定プログラムを使用して得られた動特性の推定値を表-1 に示す。ここで、解析値はシミュレーションから求めた値を示している。固有振動数の解析値と推定値を比較すると、全体的に推定値が解析値を上回っている。これは、模型の接合部にアルミニウム製アングルを補剛材として取り付けているが、解析ではそれらの影響を考慮していないため、剛性を低く見積もっていることが原因と考えられる。また、サーバー側とクライアント側との推定結果を比較すると、固有振動数および減衰定数の推定結果は等しく、サーバー側の計測データとクライアント側の受信データが同じであることがわかる。また、図-8 に振動モードの

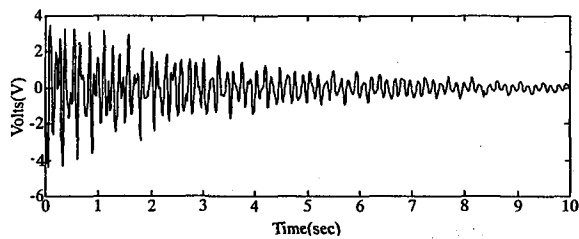


図-7 計測波形

表-1 動特性推定結果

| 次数 | 解析値        | 推定値        |        |            |        |
|----|------------|------------|--------|------------|--------|
|    |            | サーバ側データ    |        | クライアント側データ |        |
|    | 固有振動数 (Hz) | 固有振動数 (Hz) | 減衰定数   | 固有振動数 (Hz) | 減衰定数   |
| 1  | 2.2214     | 2.2730     | 0.0092 | 2.2730     | 0.0092 |
| 2  | 6.3966     | 6.8255     | 0.0091 | 6.8255     | 0.0091 |
| 3  | 9.9871     | 10.9087    | 0.0104 | 10.9087    | 0.0104 |
| 4  | 12.8047    | 14.2716    | 0.0101 | 14.2716    | 0.0101 |
| 5  | 14.6424    | 16.3687    | 0.0081 | 16.3687    | 0.0081 |

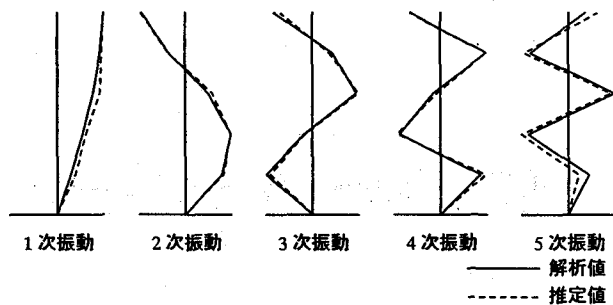


図-8 振動モードの推定結果

推定結果と解析結果を示しているが、両者はほぼ一致している。以上のことから、加速度の計測およびデータ転送が正常に行われており、本システムの有効性を確認することができた。

## 5. 無線実時間遠隔モニタリングシステム

### 5.1 無線システムのネットワーク構成

無線システム実験では、図-9に示すようにサーバーを計測現場に設置し、αDATA方式によって長崎大学総合情報処理センターのISDNターミナルアダプタにダイヤルアップ接続し、クライアントを長崎大学の学内LANに接続している。ダイヤルアップによる接続では、接続時にIPアドレスが動的に割り当てられるため、サーバーをネットワーク接続した後、電子メールを使用して、割り当てられたIPアドレスをクライアント側に通知した。

本システムでは、最大8チャンネルのA/D変換が可能である。サンプリング周波数100Hzでサンプリングした場合、必要なデータ転送速度は、約25kbpsとなる。サーバーからクライアントの間のネットワーク上において、ボトルネックとなるのは、PHSによる無線接続区間である。実験で使用したPHSのデータ転送速度は29.2Kbpsであり、電波の状態が良ければ、データ転送可能であると考えられる。

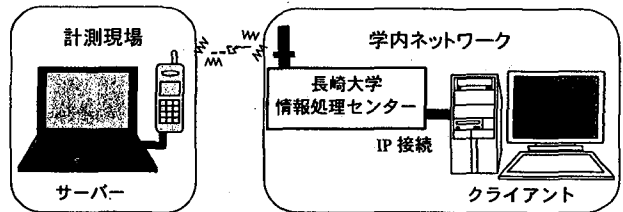


図-9 PHSによる接続

## 5.2 無線接続システム実験

### (1) 模型構造物による無線システム実験

無線実時間遠隔計測システムの有効性を確認するために、4章の有線接続の場合と同様に、模型構造物を用いて衝撃加振試験を行った。この実験では、サーバーとクライアントを同じ場所に並べて設置し、データ転送の遅延時間についても検討した。サンプリング周波数は100Hzとし、1024点(10.24秒)のデータを1度に転送することとし、計測時間を40.96秒以上となるようにした。

対象構造物は、有線システム実験と同じく5層ラーメンの模型であるが、図-10のように模型形状を変更している。

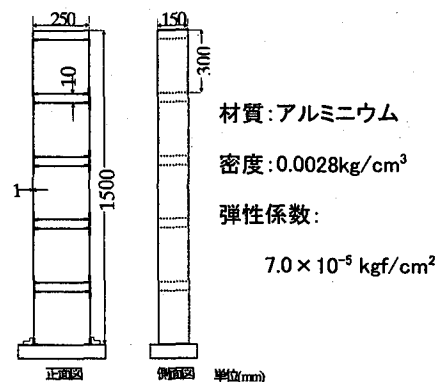
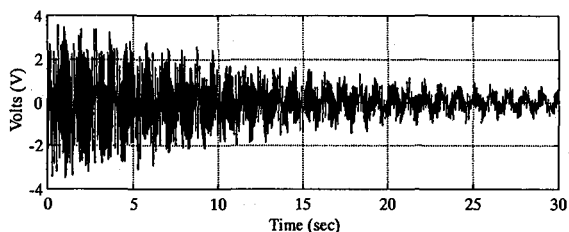


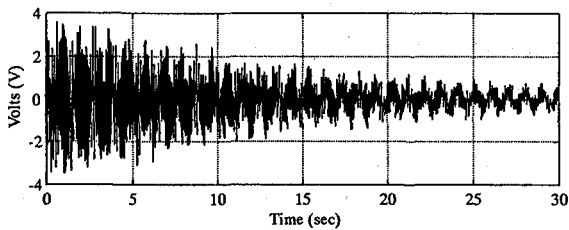
図-10 5層ラーメン模型

図-11に無線データ通信を行ったサーバー側とクライアント側の計測波形を示しているが、両者の波形は完全に一致している。データ転送は一度に、10.24秒間分を転送するようにしているが、その付近においても、データの連続性が保たれているといえる。表-2に動特性の推定結果を示す。解析値と推定値を比較してみると、1次振動と5次振動において、若干のずれが生じているが、全体的に良い一致を示しているといえる。また、有線実験の場合と同様に、サーバー側の計測データとクライアント側の受信データを用いた推定結果は等しく、両者のデータが同じであることがこのことから確認できる。次に振動モードの推定を図-12に示す。推定結果と解析結果との間に若干の差が生じているが、ほぼ満足できる推定結果が得られている。

データ転送による遅延時間を正確に測定することは困難であるが、サーバーで計測された結果がクライアントの画面に表示されるまでに、数秒間の遅れが見られた。また、



a) サーバー側



b) クライアント側

図-11 計測波形の比較

表-2 動特性推定結果

| 次数         | 解析値        | 推定値     |            |            |        |
|------------|------------|---------|------------|------------|--------|
|            |            | サーバ側データ |            | クライアント側データ |        |
| 固有振動数 (Hz) | 固有振動数 (Hz) | 減衰定数    | 固有振動数 (Hz) | 減衰定数       |        |
| 1          | 0.9793     | 0.8936  | 0.0070     | 0.8936     | 0.0070 |
| 2          | 2.8331     | 2.8140  | 0.0075     | 2.8140     | 0.0075 |
| 3          | 4.4278     | 4.5279  | 0.0066     | 4.5279     | 0.0066 |
| 4          | 5.6840     | 5.8881  | 0.0053     | 5.8881     | 0.0053 |
| 5          | 6.5078     | 7.0331  | 0.0059     | 7.0331     | 0.0059 |

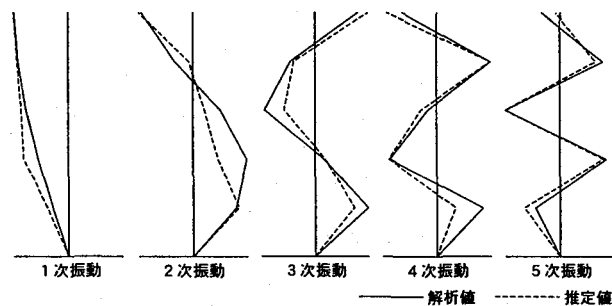


図-12 振動モード推定結果

計測するチャンネル数を変化させて実験を行った結果、遅延時間はチャンネル数に依存していることが確認された。これは、PHSの通信速度の限界に近いことを表しているといえる。

以上の模型実験の結果から、PHSを用いた無線接続システムの有効性を確認した。

## (2) 実橋実験への適用

模型実験の結果を踏まえて、無線接続による遠隔計測を実橋に適用した。対象とした橋梁は、2径間連続鋼斜張橋（歩道橋）である。表-3にその諸元を示している。

実験方法は、図-13に示すように、加速度計を6ヶ所に設置し、常時微動の計測を行った。サンプリング周波数は100Hzとし、計測時間が90秒以上となるようにした。データ通信は、図-9に示したPHSによる無線接続とした。

表-3 橋梁の諸元

|      |                                                |
|------|------------------------------------------------|
| 構造形式 | 2径間連続鋼斜張橋                                      |
| 橋長   | $L=79.450\text{ m}$                            |
| 支間長  | $L_L=28.000\text{ m}$<br>$L_R=50.700\text{ m}$ |
| 有効幅員 | 4.600 m                                        |

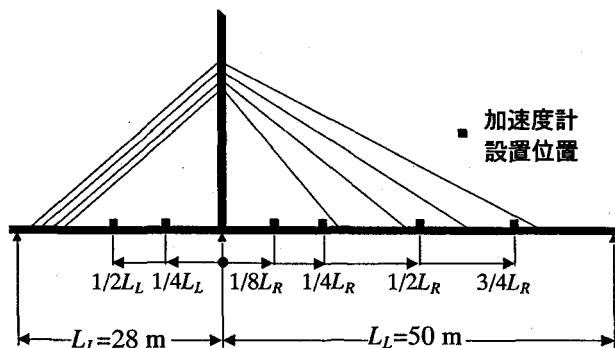
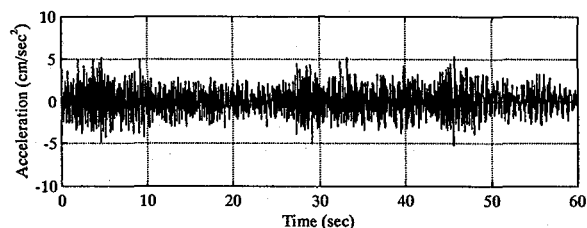
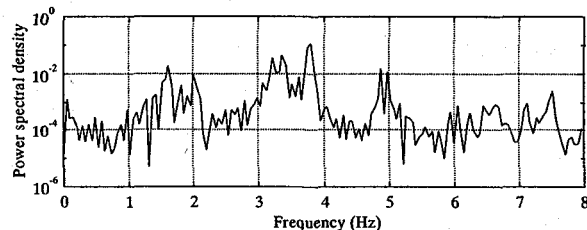


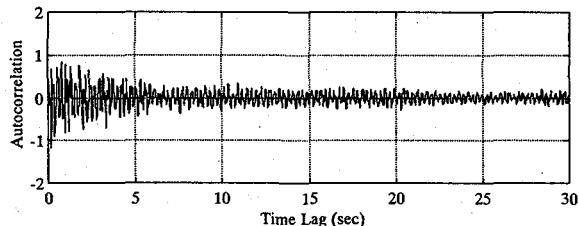
図-13 加速度計設置位置



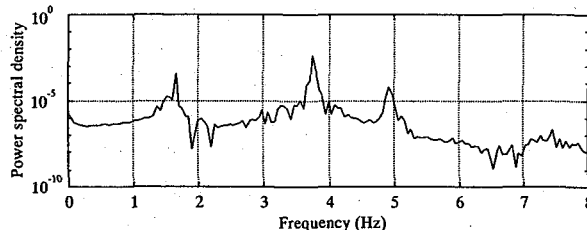
a) 常時微動波形



b) 常時微動波形のパワースペクトル密度

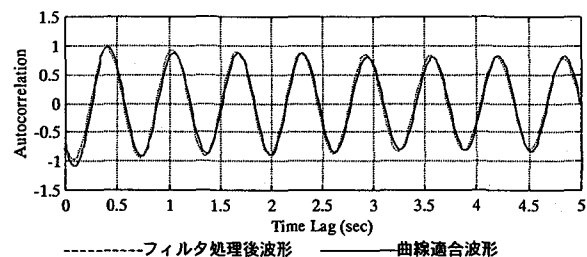


c) 自己相関関数波形

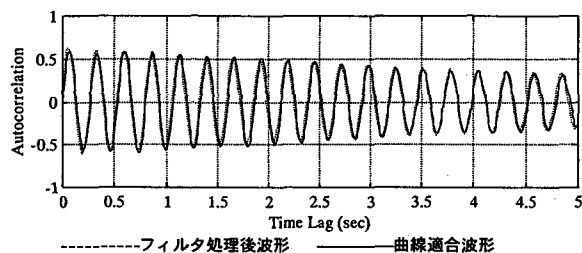


d) 自己相関関数のパワースペクトル密度

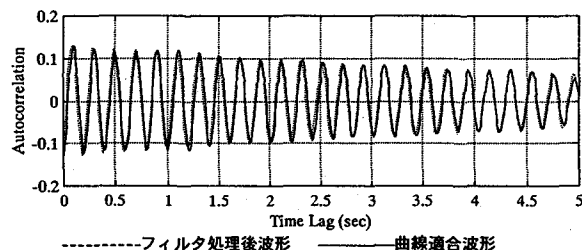
図-14 計測結果（右側径間1/8地点）



a) 1次振動



b) 2次振動



c) 3次振動

図-15 自己相関関数と曲線適合結果

図-14 に常時微動計測結果およびその自己相関関数とそれらのスペクトルを示している。自己相関関数をとることによって、常時微動に含まれる不規則振動成分が低下し、固有振動数成分が卓越することが、スペクトルを見ることによってわかる。これをフィルタ処理して、各固有振動数成分の自己相関関数を抽出し、図-15 に示すように、曲線適合<sup>9)</sup>し常時振動から振動特性を推定する。

このような操作によって得られた動特性の推定結果を、表-4 に示す。ここで解析値は設計時の資料を参考にして、解析値と推定値を比較すると、1次振動で約23%、2次振動で約18%、3次振動で約16%の推定誤差が生じている。これは解析モデルで考慮されていない剛性などの影響であると考えられる。また、サーバー側とクライアント側の推定値は等しい値を示している。これより、サーバーで計測されたデータは、データ通信によるデータの欠落が生じることなく、クライアント側で受信されており、両者のデータは全く等しいといえる。図-16 に振動モードの推定結果を示しているが、いずれも、解析結果と良く一致している。

以上の結果から、本システムを用いることにより、実橋の振動特性を推定するために、遠隔地から振動の計測をリアルタイムで実行することが可能であることを示した。また、計測結果を用いて、橋梁の振動特性を精度良く推定できることが確認された。

表-4 動特性推定結果

| 次数 | 解析値        | 推定値        |        |            |        |
|----|------------|------------|--------|------------|--------|
|    |            | サーバー側      |        | クライアント側    |        |
|    | 固有振動数 (Hz) | 固有振動数 (Hz) | 減衰定数   | 固有振動数 (Hz) | 減衰定数   |
| 1  | 1.340      | 1.6570     | 0.0045 | 1.6570     | 0.0045 |
| 2  | 3.148      | 3.7236     | 0.0049 | 3.7236     | 0.0049 |
| 3  | 4.253      | 4.9517     | 0.0043 | 4.9517     | 0.0043 |

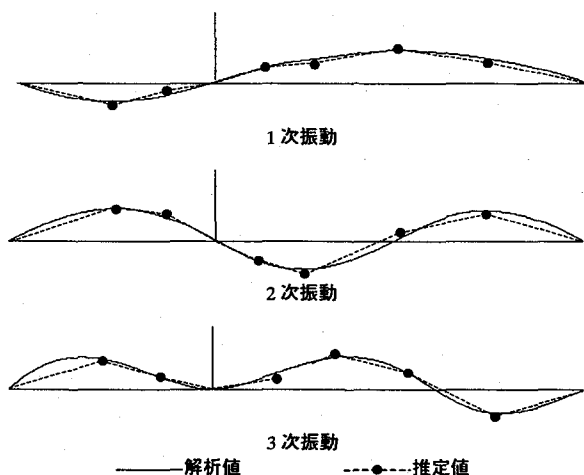


図-16 モード推定結果

## 6. まとめ

近年、橋梁振動計測では、小規模な計測装置を用いて計測現場での高い精度の振動特性の推定値を得るための技術と、土木構造物の維持管理や既存施設の運用状態を遠隔で監視し、安定した運用を支援する技術が必要となっている。

本研究では、著者らがすでに開発している可搬型動特性推定システムにネットワーク接続のための通信媒体を組み込むことでモバイルコンピュータ化を行い、TCP/IP によるデータ通信を利用した実時間遠隔計測システムの開発を行った。

また、開発したシステムを用いて、模型構造物と実橋における振動計測実験を行い、本システムの有効性について検討を行った。

本研究で得られた結果を要約すると、次のようになる。

(1) 構造物における振動計測データをリアルタイムでデータ通信するために、TCP 接続によるデータ通信プログラムを組み込んだ。このプログラムでは、計測側のコンピュータをサーバー、モニターする側のコンピュータをクライアントとするクライアント・サーバー型のアプリケーションを構築することができる。

(2) データ通信プログラムを可搬型動特性推定システムに組み込み、有線でネットワークに接続させることで、有線実時間遠隔計測システムの開発を行った。また、このシステムを模型構造物の衝撃加振試験に適用し、サーバー側



とクライアント側のデータを比較することにより、システムの有効性を確認した。

(3) 可搬型動特性推定システムに PHS と PHS 用データ通信 PC カードを組み込み、モバイルコンピュータ化することで、無線遠隔計測システムの開発を行った。このシステムを模型構造物の衝撃加振試験に適用し、システムの有効性を確認した。

(4) 開発した無線遠隔計測システムを、斜張歩道橋の常時微動計測に適用し、遠隔地から橋梁振動の計測をリアルタイムで実行することが可能であることを示した。また、計測結果を用いて、橋梁の振動特性を精度良く推定できることを示した。

(5) PHS での無線接続では、ダイヤルアップ接続の度に IP アドレスが動的に割り当てられるため、サーバーの IP アドレスを何らかの手段で、クライアント側に通知する必要がある。この問題に対し、本実験では電子メールでクライアント側に通知することで対処した。

以上の結果より、サーバー側の計測データとクライアント側の受信データは等しいことから、データ欠落のない実時間遠隔モニタリングを実現し、さらに振動実験での実測データから、高い精度での振動特性が推定可能であることから、開発したシステムの有効性を確認した。

今後の課題としては、本システムを実用化させるために、多くの使用実績を蓄積し、実橋における本システムの有効性を確固たるものにする必要がある。また、サーバーの IP アドレスを自動的に通知する手段を確立し、無線実時間遠隔計測システムを用いた構造物の無人化計測システムの開発を行うことである。

## 参考文献

- 1) 安部允, 杉箱政雄, 小芝明弘: 鋼橋の点検・診断用システムと機器, 橋梁と基礎, pp.173-179, 1997.8.
- 2) 寺尾圭史, 松本好雄: 橋梁モニタリングシステムの開発, 横河ブリッジグループ技報, No.27, pp.186-188, 1998.1.
- 3) 総合的な橋梁リエンジニアリング橋梁(鋼橋)の健全度診断調査, JCCA, No.201, pp.48-51, 1998.10.
- 4) 越出慎一: 光ファイバ・センサとその知的構造への応用, 非破壊検査, 第3号, pp.152-156, 1994.4
- 5) R. M. Measures: Monitoring composite Structures, Transportation Research Broad Convention, pp1-4, 1993.1.
- 6) 山内雪路: モバイルコンピュータのデータ通信, 東京電機大学出版会, 1998.3.
- 7) MC & MD 研究会編: モバイルコンピューティング・, 日刊工業新聞, 1998.8.
- 8) 山本鎮男: ヘルスモニタリング, 共立出版, 1999.8.
- 9) 岡林隆敏, 山森和博, 田丸康博, 吉村徹: 可搬型振動計測システムによる構造物の振動特性推定, 土木学会論文集, No.591/I-43, pp.327-337, 1998.4.
- 10) 岡林隆敏, 山森和博, 讃岐康博, 田村太一郎: 近接固有値を有する構造物の振動特性推定, 土木学会論文集, No.633/I-49, pp.93-102, 1999.10.
- 11) 喜多信悟, 青景平昌, 酒向信一, 岡野幹雄, 奥松俊博: テレアースワークシステム(遠隔土工システム)の開発「雲仙復興工事への適用」, フジタ技術研究所報, 第31号, pp.73-78, 1995.
- 12) 若林宏: 図解標準 TCP/IP ハンドブック, 秀和システム, 1999.1.
- 13) LabVIEW ユーザマニュアル, National Instruments, 1998.7.

(1999年9月17日受付)