

# I-28 設備診断を目的とした Web サービスによる 遠隔音響情報データベースの構築

Development of Distant Sound Information Database

Using Web Services for Facility Diagnosis

矢吹 信喜<sup>1</sup>      植田 国彦<sup>2</sup>      小谷 隼<sup>2</sup>  
Nobuyoshi Yabuki      Kunihiko Ueta      Jun Kotani

【抄録】土木構造物や設備の維持管理や保守点検において、熟練した現場技術者は、打音や機器の操作音によって初期段階の異常診断を行うことが多い。本研究では、こうしたスキルを非熟練者でも可能とし、音響データから諸構造や設備の異常を診断することを目的として、PDA や小型のノートパソコンと遠隔音響データベースを用いた診断手法を提案し、システム開発を行った。ボルト・ナットの締付けトルクの違いによる打音の違いを検討し、ボルトの緩みを診断する簡単な指標を考案した。また、複数の遠隔にあるデータベースを現場から検索し、過去の音や別の類似音を聞くことが可能なシステムを Web サービスを使用して開発した。

【Abstract】 In maintenance and inspection of civil infrastructures and facilities, experienced field engineers can often detect malfunctions or damage by listening to the hammering sound or machine sound in the early stage. In this research, we proposed a malfunction detection methodology by sound data, allowing inexperienced engineers acquire such skill and using PDAs, small laptop computers, and databases, and developed a prototype system based on the methodology. We proposed a simple detection index for diagnosing loosened bolts based on the hammering sound difference. In addition, we developed a system which the user can examine the distant databases and obtain previous sounds, using the web service technology.

【キーワード】音響, 打音, ボルト, 診断, SOAP, Web サービス, データベース,

【Keywords】 sound, hammering sound, bolt, diagnosis, SOAP, web service, database

## 1. はじめに

土木構造物や設備の維持管理においては、現場における点検を適切に行うことが重要である。また、点検の際に何か異常を感じた場合、専門的な知識、現場経験による勘や蓄積された点検データに基づいて適切な判断を下す体制を整えておくことが肝要である。しかし、点検現場において携帯できる資料や機器は限られる。また、点検員の点検結果が必ずしも連続的に引き継がれず、異常時に以前の点検データとの比較が出来ないこともある。

日常の巡視点検では、視覚、聴覚、触覚、臭覚とい

った感性を働かせている。特に聴覚によって得られる感性情報は、非常時や不定期に作動させるような設備の異常を感知する上で貴重である。

音響による構造物や機械類の診断に関しては、ボルトやコンクリートをハンマーで叩いた時の音を聞くことにより、ボルトの締付け具合やコンクリートの内部の空洞などを診断することは昔から行われている。また、こうした音響による診断に関する研究もなされている<sup>1) 2)</sup>。しかし、一般に暗騒音や叩き方などの問題もあり、現場で定量的に評価することは容易ではない。また、音響解析システムは一般に大きさや重さが大き

1 正会員 Ph.D. 室蘭工業大学工学部建設システム工学科 助教授 〒050-8585 室蘭市水元町 27-1  
TEL: 0143-46-5219 FAX: 0143-46-5218 Email: yabuki@news3.ce.muroran-it.ac.jp  
2 学生会員 室蘭工業大学大学院工学研究科建設システム工学専攻

いことから、点検実務への適用は極限られた範囲が対象となっている。一方、パソコンはより小型軽量化し、PDA (Personal Digital Assistants) でも音データを取得することが可能になってきた。

さらに、ダムのゲートやバルブ等では、稀にしか操作しない場合、「異常かも知れない」と思われるような音が発生し、操作員が驚いて、不安になることがある。こうした場合、以前に操作した時の音や、他の場所での類似ケースでの音が即座に聞くことが出来れば、不安が払拭されよう。また、これまでにないような本当に異常な音であることがわかれば、適切な対応により、危機管理の一助になると考えられる。

そこで、本研究では、小型のノートパソコンあるいはPDAを利用した音響データ収録及び異常診断支援システムを開発することとした。さらに、収録した音響データをデータベース化して、各事務所で管理する一方、現場や他の事務所の現場における点検者が、Internetを経由してアクセスできるように、点検者側のプラットフォームやアプリケーションに依存しないコンピュータ間のデータ通信を実現することを目的として、SOAP<sup>3)</sup> (Simple Object Access Protocol) による「Web サービス」<sup>4)</sup>を用いた音響データベースのシステムモデルを開発し、そのプロトタイプシステムを構築した。

2. PDAとデータベースを用いた音響による診断手法

熟練した現場技術者の中には、打音や機械の作動音を聞くことにより点検個所の異常を診断できるスキルを暗黙知として有している者が多い。こうしたスキル

を組織全体で有効に活用することを目的として、音響による異常診断システムを構築することとした。図-1に音響による異常診断システムのシステムモデルを示す。

点検員は、PDA 又は小型のノートパソコン (PC) を携行して現場に行き、構造物を点検する際、テストハンマーによる打音や設備の操作音等を録音する。多少異常を感じた場合は、PDA 又はPCに内蔵された信号処理・波形解析プログラムにより、フーリエスペクトル、スペクトログラム、ウェーブレット解析等を実施し、評価を行う。

さらに異常を感じたり、あるいは以前の音を知らない場合、A管理事務所のデータベースにInternetを介して問合せをし、返答又は必要に応じて音データを得て、PDA 又はPCにて音を再生する。また、点検員が他の事務所が管理する設備の類似音を検索したくなれば、A管理事務所のSOAPサーバAに問合せをすれば、自動的に、他の管理事務所のSOAPサーバB, C, …に問合せをし、点検員に検索された結果や音データを返す。

点検員が録音した音データは、音響データベースに関連するデータと共に蓄えられる。

本研究では、以上のような方法論を提案し、プロトタイプシステムを構築した。

3. 打音実験による本手法の検討

3. 1 打音実験の方法

音により構造物や設備の異常等が診断できるかどうかを確認するために、ボルト・ナットを用いた簡単な

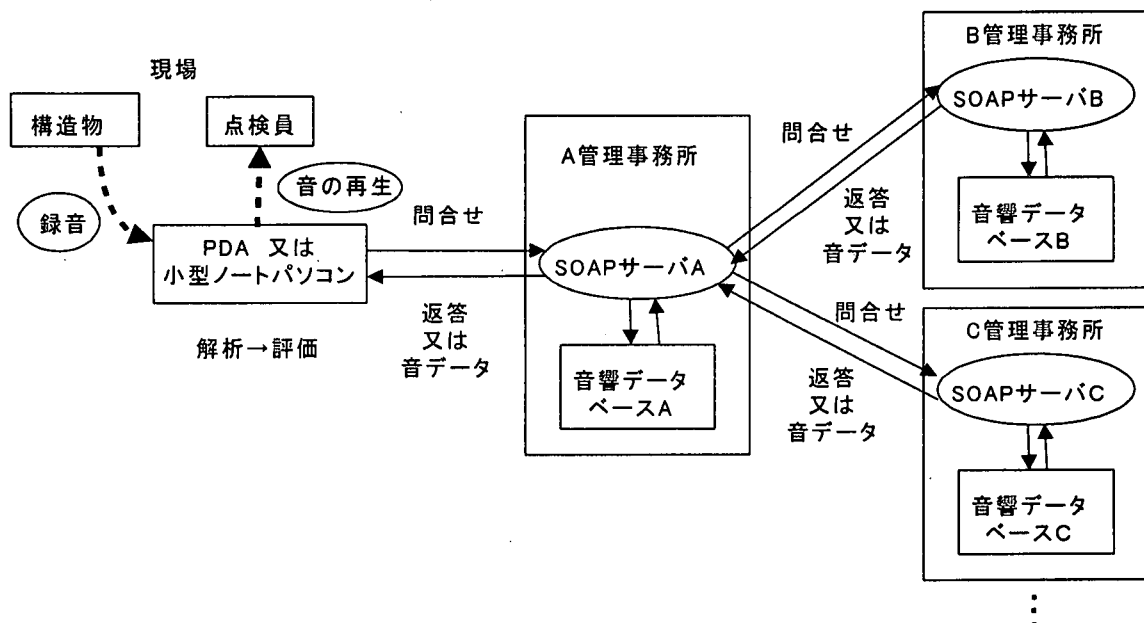


図-1 音響による異常診断システムモデル

打音実験を実施した。実験に使用した供試体は、図-2に示すような長さ640mmの鋼製板とCチャンネルを2本の高力ボルトにより接合したものである。実験では、床面と供試体の間で音が伝播するのを抑えるために布を緩衝材として敷き、ボルトを手の力だけで軽く締めた(手締め)ケース(以下、case1と呼ぶ)と120Nmの締付トルクでボルトを締めたケース(以下、case2)に対して、テストハンマーにより、なるべく一定の力で図-2に示すようにナットの角の部分に打撃を加えた。

打撃音の収録方法としては、PDAに内蔵されているマイクロフォンを使用して録音する方法と、ノートパソコンに外付けのマイクロフォンを接続して録音する方法を比較検討した。尚、両方法とも、ナットから約40cm離れた場所にマイクロフォンを設置し、録音データはWAVEファイル形式で保存した。サンプリング周波数は44.1kHzとした。打音は、一つのケースについて5回ずつ行い、それぞれの音を別ファイルとして記録した。

### 3.2 音データの解析方法

録音した音データの解析を行うためには、MATLAB<sup>5)</sup>を使用して、波形、フーリエスペクトル、サウンドスペクトログラム、連続ウェーブレット解析の表示を一貫して実行できるシステムを構築した。

サウンドスペクトログラムは、周波数分析を時間的に連続して行う解析方法である。横軸が時間、縦軸は周波数を示しており、色の濃い部分は、そこに音声信号の成分が集中していることを示している。色が淡い部分は、音声信号の成分が存在しないことを示している<sup>6)</sup>。

連続ウェーブレット解析は、測定した波形に、平均値がゼロで、有限な継続時間を持つ波形(マザーウェーブレット)を重ね合わせ、両者の関連性を求める解析方法である。連続ウェーブレット解析によって得られる結果は、横軸に時間、縦軸にスケール(マザーウェーブレットの長さ)をとり、波形に含まれる周波数成分の相対的な大きさを明度値で与えられる図である。マザーウェーブレットには Daubechies3 (db3) - Wavelet<sup>7)</sup>を用いた。縦軸は局所的な周波数成分を示し、大きければ大きい程、低い周波数を示す。

フーリエ解析は連続的な音をすべて周波数領域に変換するため音全体の周波数成分を解析するには適しているが、時間情報が失われてしまうという欠点がある。サウンドスペクトログラム及び連続ウェーブレッ

ト解析は、機械の作動音等の連続的な音の局所的な波形の変化を捉えることに適している<sup>1)</sup>。サウンドスペクトログラム、連続ウェーブレット解析を解析手法として用いることにより、周波数と同時に時間もとらえる時間-周波数解析が可能となる。

### 3.3 PDAとパソコンの収録音の比較

PDAとパソコンで録音したcase1とcase2の音データのフーリエスペクトルの中から代表的なものを図-3に示す。PDAとパソコンの解析結果画面を比較すると、フーリエスペクトルの図では、PDAの方に全周波数領域でノイズとみられる成分があるが、打音の周波数特性には大きな差がないことが確認できた。また、サウンドスペクトログラムと連続ウェーブレット解析の解析結果にも大きな差が生じなく、PDAとコンピュータで5回ずつ録音した波形は、それぞれ規則性を持った挙動を示していた。以上より、PDA及びパソコンで録音した打音は解析を行うのに妥当であると考えられる。

また、本モデルでは、点検員は音響データベースから取得した音をPDAにて再生して、現場の音と比較して、打音点検の正否の判断を行う。そのため、PDAは録音した音データをなるべく変化させることなく、再生する機能を有していることが望ましい。そこで、120Nmの締付トルクでナットを締めた時のcase2の打音において、現場の音(PDAで録音した音データ)と、その音データをPDAで再生してパソコンとマイクで取得した音データの比較を行った。それぞれのフーリエスペクトルを図-4に示す。

フーリエスペクトルより、PDAから発せられる再生音は、2kHz以下と7kHz以上の音成分が小さくなる傾向があるがスペクトルの形はほぼ等しいことが確認

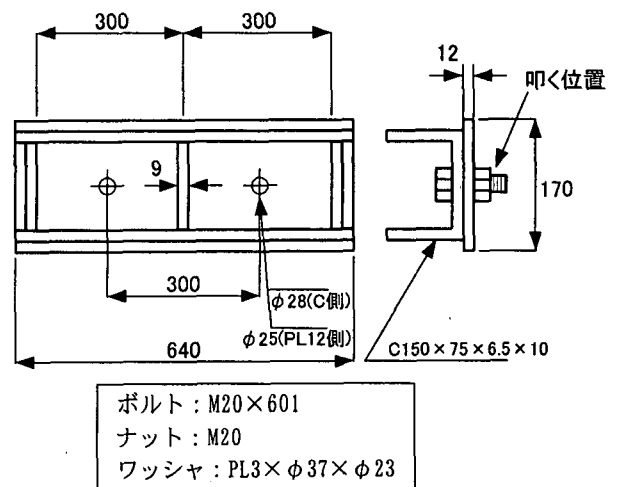


図-2 実験供試体

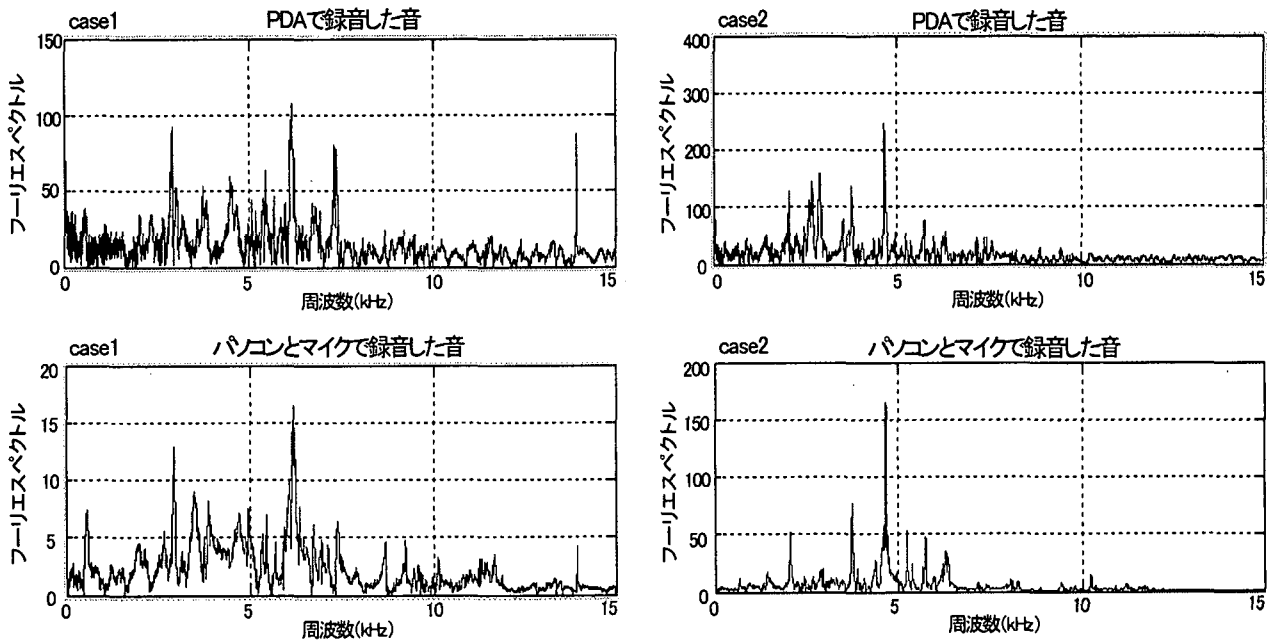


図-3 PDAとパソコンで収録した音の比較 (case1, case2)

できた。それゆえ、PDAで再生した音を点検の比較に用いることは、ほぼ妥当であると考えられる。

そこで、本研究では、点検員の現場での作業性を考え、PDAで録音したcase1とcase2の打音実験について比較・検討した。

### 3.4 解析結果

PDAで録音したcase1(手締め)とcase2(120Nmの締付トルク)の打音実験の波形、フーリエスペクトル、サウンドスペクトログラム、連続ウェーブレット解析の解析結果画面をそれぞれ図-5の(a)(b)(c)(d)に示す。

図-5(a)の波形より、case1よりcase2の方が打撃音の減衰が小さく、音が長く継続していることがわかる。図-5(b)のフーリエスペクトルから、case1では、若干卓越した周波数が3 kHz, 6 kHz, 7 kHz, 14 kHz付近にあるが、打音が全周波数領域に広く分散していることが確認できる。case2では、3 kHz, 4.5 kHz付近の周波数が非常に卓越しており、他の周波数の成分は少ないことが確認できた。図-5(c)のスペクトログラムから、case1では、全周波数領域に広く分散し、減衰が大きい、14 kHz付近は長く継続していること、case2では、3 kHz, 4.5 kHz付近の成分が強く長く継続していることが確認できた。図-5(d)のウェーブレットでは、縦軸のスケールが周期に相等し、白い部分はウェーブレット係数(波形の振幅に相等)が大きく、黒い部分は小さいことを表す。case2では、音の最初の部分においてスケール10付近が強く、

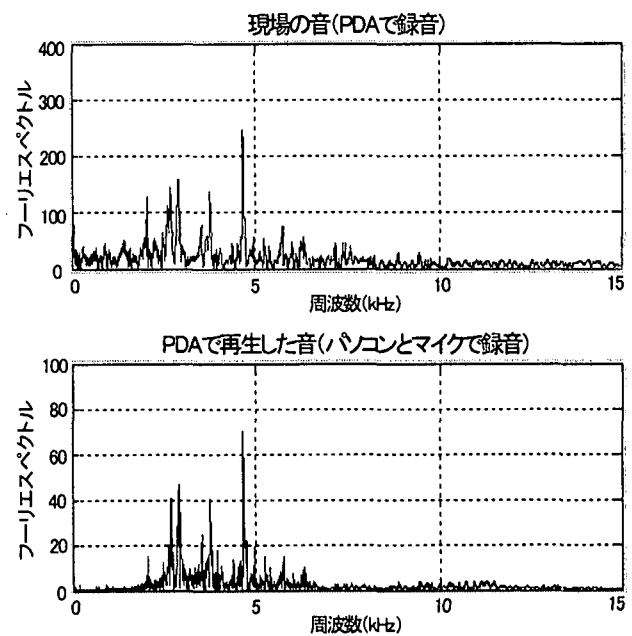


図-4 現場の音とPDAで再生した音

case1は広いスケールに分散していることがわかる。

さらに、定性的にはcase1は「にぶい音の中に高いキーンとした音が混じった音」、case2は「はっきりとした、にごっていない、きれいに響く音」と表現される。図-5の解析結果は、こうした感性的な情報を裏付けるものであると考えられる。

### 3.5 ボルトの緩み感知する指標

音の波形は、時間とともに減衰していくが、本研究では、ボルトの緩み感知する指標として、波形減衰図(図-6)に示す初期の最大振幅 $a$ が、1/10に減衰

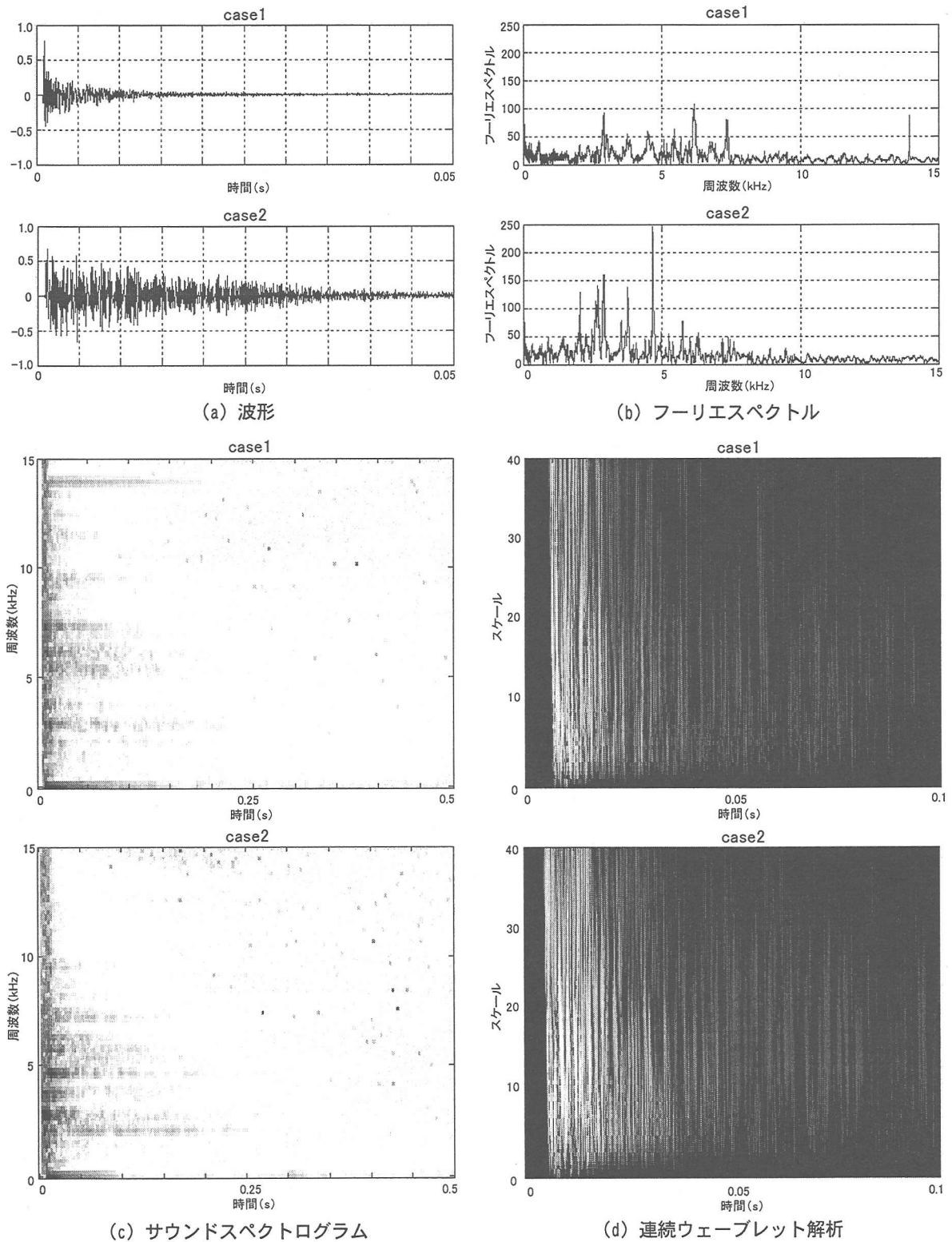


図-5 PDAで収録した音の各種解析結果

するまでの時間  $T$  を減衰時間として設定した。120Nm の十分なトルクで締付けた case2 の平均減衰時間は、0.03725 秒であったが、手締めの場合 case1 では、0.011 秒と短かった。この実験に用いた供試体については、

$$T > 0.03 \text{ s}$$

であれば、ボルトの締付けは十分であり、逆に

$$T < 0.02 \text{ s}$$

であれば、締付けが不十分な可能性があることを示唆しているといえる。

こうした実験を多くの供試体や実構造物を対象に行い、データを蓄積することにより、より適切な指標を得ることができるものと考えられる。

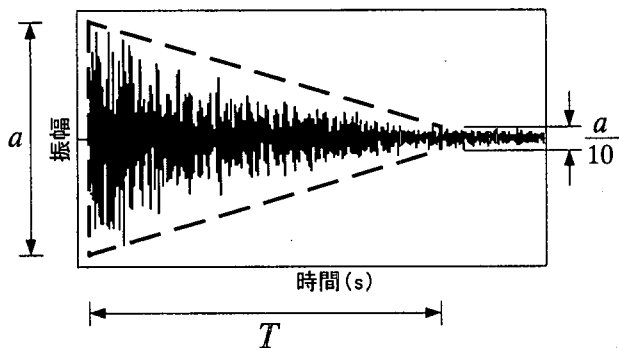


図-6 波形減衰と減衰時間

#### 4. 音響データベース

本研究で開発したシステムモデルでは、ダムや橋梁等の管理事務所内に、管理している構造物や設備の操作音や打音等のデータを保管するデータベースを備える。現場の点検員は、PDA やノートパソコンを現場内の LAN (Local Area Network) から Internet を介して事務所のデータベースにアクセスして、必要なデータを検索したり、音データをダウンロードする。さらに、点検者は、他の複数の事務所の管理する構造物も含めて、検索することを可能とする目的から、本研究では、Web サービスを用いて、複数の遠隔データベースを検索できるようにした。

##### 4. 1 Web サービス

インターネット上の異なるコンピュータに存在する複数の異なるオブジェクト(プログラム)間において、システムの連携を図る方法として、分散オブジェクト技術がある。その代表的なものとして、CORBA (Common Object Request Broker Architecture) と DCOM (Distributed Component Object Model) 等があげられる。しかし、これらの技術は、ある程度閉じられた世界での使用には向いているものの、データのセキュリティを確保しながら、ファイアウォールを通過させようとするのは困難である。

Web サービスとは、分散オブジェクトを、特別な実行環境等を必要とせず、Internet の標準の protocols やツールを使って実現するサービスであり、比較的安価に実装できるものである。また、オブジェクトの開発言語に依存しないため、既存のシステムを活用できる。さらに、オブジェクト間にファイアウォールが存在してもデータを通過させることができる。Web サービスを可能としたのは、XML と XML を基礎とした SOAP である。

SOAP とは、ネットワーク上の離れた別のコンピュータにあるプログラムを動作させるために行う RPC

(Remote Procedure Call) や、XML によって記述されたメッセージの交換を行うためのプロトコルである。メッセージ交換には、SOAP メッセージと呼ばれる一定の形式に従った XML に記述されたメッセージを通信手段に用いる。XML はテキストデータであるため、特定のプログラミング言語やプラットフォームに依存せず、簡単で柔軟性が高い。

本研究では、Web サービスを図-7 に示すように実装した。Web サービス内には、SOAP サーバがあり、外部と SOAP メッセージのやり取りをしながら、内部のデータベースとの間でデータのやり取りを行う。システム動作環境として、Java プログラムには Java 2 SE SDK 1.4.0, サーバ環境に Jakarta Tomcat 4.1.18, Web サービス実行・開発環境に Apache Axis 1.1 beta を使用した。

##### 4. 2 データベース

本研究で開発する音響データベースには、音を採取した日時、対象物、場所、点検者名、及び音のデジタルデータファイルを保管してある場所 (URL) の 5 つのデータを蓄積することとした。データベースとしては、リレーショナルデータベースを採用し、実装にはフリーでオープンソースである PostgreSQL<sup>8)</sup> を DBMS (Database Management System) として使用した。また、OS には、汎用性、安全性等を考慮して Linux<sup>9)</sup> を使用した。データベースのデータの一部を図-8 に示す。

また、SOAP サーバからデータベースへのシステムコールを行うための手段として Java のライブラリ群である JDBC (Java Database Connectivity) を使用した。JDBC は、Java アプリケーションから使用する JDBC ドライバマネージャと、DBMS に依存する JDBC ドライバとを分離することにより、DBMS ベンダに依存しない環境を提供できる。

さらに、本データベースでは、音のデータファイルが保管されている URL から、クライアントは FTP (File Transfer Protocol) により音ファイルを取得することができる。

##### 4. 3 音響データベースの動作

開発した音響データベースを用いて、本学内において、クライアントのパソコンからサーバへ、検索条件を SOAP メッセージとして送り、データベースでの検索結果をクライアントに返すという動作の確認を行った。

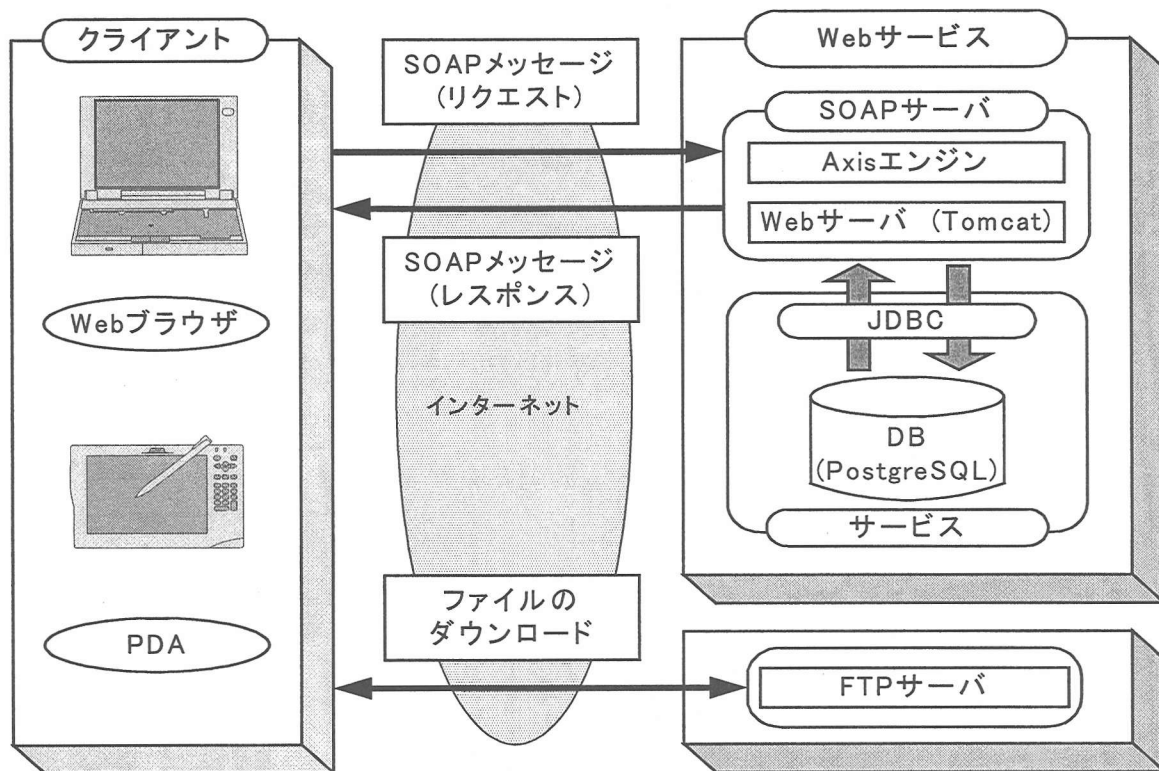


図-7 本研究における Web サービス

クライアントから問合せ（クエリ）に基づいてサーバへ送ったリクエストの SOAP メッセージを図-9に示す。また、Web サービスからのレスポンス SOAP メッセージを図-10に示す。本システムでは、このクライアントへのレスポンス SOAP メッセージの中にある URL から、自動的に該当する音データを FTP によりダウンロードし、再生させることができた。

### 5. おわりに

本研究では、土木構造物の打音や関連設備の操作音などの音響データから諸構造や設備の異常を診断することを目的として、PDA や小型のノートパソコンと Web サービスによる遠隔音響データベースを用いた診断手法を提案し、システム開発を行った。本研究の結論は以下のとおりである。

- ボルト・ナットの締付けトルクを変えて打音試験を行ったところ、PDA による録音や再生でも、外付けマイクロフォンとパソコンを使用した場合と、大きな差はなく、PDA でも診断に利用可能だと考えられる。
- ボルトが緩い場合と所定のトルクを与えて締付けた場合とでは、スペクトル解析を行ったところ、有意な差があり、特に減衰する時間に注目することにより、ボルトの緩みを感知する指標を考案した。

```
hamano=# SELECT * FROM sounddb;
 id | date | url | object | place | inspector |
-----+-----+-----+-----+-----+-----+
 1 | 2002-09-08 | pump | inspection-gallery-1 | S.Hamano | ftp://yb1
04.ce.muroran-it.ac.jp/sounds/a20020908.wav
 2 | 2002-09-18 | wall | inspection-gallery-1 | S.Hamano | ftp://yb1
04.ce.muroran-it.ac.jp/sounds/b20020918.wav
 3 | 2002-09-26 | pump | inspection-gallery-2 | S.Hamano | ftp://yb1
04.ce.muroran-it.ac.jp/sounds/c20020926.wav
 4 | 2002-09-30 | wall | inspection-gallery-2 | S.Hamano | ftp://yb1
04.ce.muroran-it.ac.jp/sounds/d20020930.wav
 5 | 2002-10-03 | pump | inspection-gallery-3 | S.Hamano | ftp://yb1
04.ce.muroran-it.ac.jp/sounds/e20021003.wav
 6 | 2002-10-11 | wall | inspection-gallery-3 | S.Hamano | ftp://yb1
04.ce.muroran-it.ac.jp/sounds/f20021011.wav
 7 | 2002-10-20 | pump | inspection-gallery-4 | S.Hamano | ftp://yb1
04.ce.muroran-it.ac.jp/sounds/g20021020.wav
 8 | 2002-10-29 | wall | inspection-gallery-4 | S.Hamano | ftp://yb1
04.ce.muroran-it.ac.jp/sounds/h20021029.wav
```

図-8 音響データベースの一部 (PostgreSQL)

- 過去の打音や操作音を、データベースに蓄えておくことにより、現場で検索して必要な音を聞ける環境を開発した。DBMS には PostgreSQL, OS には Linux を使用した。SOAP による Web サービスを使用することにより、現場の点検員が PDA やノートパソコンから複数の遠隔にあるデータベースを検索することができるようにした。また、検索によって得られた音のデジタルデータを FTP により転送し、現場でその機器などの過去の音や他の地点の類似音を聞いて、比較検討できるようにした。

今後は、ボルト・ナットのトルク値を細かく変化さ

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
- <soapenv:Envelope xmlns:soapenv="http://schemas.xmlsoap.org/soap/envelope/"
  xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
  xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance">
- <soapenv:Body>
  - <Select soapenv:encodingStyle="http://schemas.xmlsoap.org/soap/encoding/">
    <URL xsi:type="xsd:string">url</URL>
    <DATE xsi:type="xsd:string">2002-09-08</DATE>
    <OBJECT xsi:type="xsd:string">pump</OBJECT>
    <PLACE xsi:type="xsd:string">inspection-gallery-1</PLACE>
  </Select>
</soapenv:Body>
</soapenv:Envelope>
```

図-9 SOAP メッセージ (リクエスト)

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
- <soapenv:Envelope xmlns:soapenv="http://schemas.xmlsoap.org/soap/envelope/"
  xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
  xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance">
- <soapenv:Body>
  - <SelectResponse
    soapenv:encodingStyle="http://schemas.xmlsoap.org/soap/encoding/">
    <SelectReturn xsi:type="xsd:string">ftp://yb104.ce.muroran-
      it.ac.jp/sounds/a20020908.wav</SelectReturn>
  </SelectResponse>
</soapenv:Body>
</soapenv:Envelope>
```

図-10 SOAP メッセージ (レスポンス)

せたり、その他の機器類の操作音のデータを収集して、設備診断の各種指標を提案するとともに、データベースと Web サービスの機能を向上させていきたいと考えている。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、室蘭工業大学情報工学科の久保洋教授と SVBL（当時）の長井隆博士に多大なるご協力を頂きました。また、電源開発株式会社及び社団法人日本鉄鋼連盟よりご支援を頂きました。ここに深謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 小林健二：音・振動による診断工学，コロナ社，2000.
- 2) 植田康平，小幡卓司，林川俊郎，佐藤浩一，宮森保紀：鋼橋の損傷同定におけるフラタクル次元解析の適用性について，土木学会北海道支部論文報告集，Vol.58，pp.32-35，2002.
- 3) SOAP：<http://www.w3.org/TR/2002/WD-soap12-part0-20020626/>
- 4) S. Wu, A. Lee, G. Aouad, and C. Fu：Web Services for Crime Deterrent Design Knowledge, CIB w78 Conference, Waiheke Island, New Zealand, pp.456-462, 2003.
- 5) MATLAB：<http://www.mathworks.com/index.shtml>
- 6) (社)日本自動認識システム協会：バイオメトリクス，音声：<http://www.aimjapan.or.jp/bkindex/bio/jpn/Technologies/Voice/Vce-00.htm>
- 7) 榎原進：ウェブレットビギナーズガイド，東京電気大学出版局，1995.
- 8) PostgreSQL：<http://www.postgresql.org/>
- 9) Linux：<http://www.postgresql.org/>