

鋼橋における音響モニタリングシステムの開発について

Developmental Study on Sound Monitoring System for Damage Identification of Steel Bridge Superstructures

北海道大学大学院工学研究科 正員 小幡卓司 (Takashi Obata)
 北海道大学工学部土木工学科○学生員 浅香康弘 (Yasuhiro Asaka)
 北海道大学大学院工学研究科 F会員 林川俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
 北海道大学大学院工学研究科 F会員 佐藤浩一 (Koichi Sato)
 北海道大学大学院工学研究科 学生員 宮森保紀 (Yasunori Miyamori)

1. まえがき

わが国では、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、非常に多数の社会基盤施設が建設されてきた。これらの基盤施設は、今日では壮年期を迎えつつあると言われており、その老朽化はこのまま無対策で経緯すれば急速に進むことが予測されている。従来では、新たな道路ネットワークの形成を目指すような開発的資本投資も行われてきたが、近年の投資余力の減少や工事に起因する交通規制による社会的損失、あるいは環境への意識の高まり等から、今後は維持管理を強化し、必要に応じて補修を行うことにより、既存橋梁の長寿命化を目指すことが大きな課題となりつつある¹⁾。

供用中の橋梁における健全度に対する現状把握は、これらを実現するための重要な要素技術となっているが^{2,3)}、構造物の損傷・健全度に対する工学的評価・判定は専ら専門技術者の判断に委ねられる場合が大半である。しかしながら、我が国においてはこのような技術者養成の教育システム等も整備されていないため、今後急激に高まるであろう人的ニーズに対応することは、極めて困難であると判断せざるを得ない。よって、上記の問題解決には、橋梁の損傷度・健全度診断に際して何らかのモニタリングシステムを構築し、測定から診断まで一貫して行える手法を早期に確立することが極めて重要であると考えられる。この有効な解決方法のひとつとして、振動・音響モニタリングで得られたデータから、構造特性を逆解析的に求めて損傷を同定しようとする手法が期待されている^{2~13)}。すなわち、近年では振動・音響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り、計測装置あるいは解析技術の著しい進歩から、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、著者らは鋼橋の損傷同定あるいは健全度診断に用いるために、比較的高周波数帯域の局部振動を対象とした音響モニタリングならびにデータ解析手法について検討を行ってきた^{10~13)}。本研究においては、汎用的かつ容易に測定から解析までが可能となるような音響モニタリングシステムの構築を目的として、各種音響機器とPCを接続することにより検討を加えようとするものである。具体的には、まず Digital Audio Interface とダイナミックマイクを用いて最大 8Ch までのデータ収録が可能なシステムを構築する。このシステムを用いて、センサーとしての性能確認を行った上で、実験供試体に対して測定を行い、その適用性・有効性等に関して考察を加えた。した



写真-1 モニタリングシステム



写真-2 マイク本体

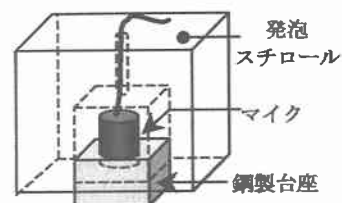


図-1 センサー構造図

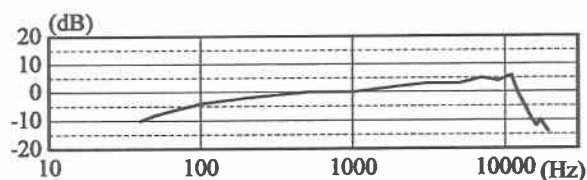


図-2 入力周波数に対するマイクのゲイン



写真-3 Roland 社製 DA-2496

がって、本研究はこれらの結果を報告するものである。

2. 音響モニタリングシステム

本研究で構築したモニタリングシステムは、写真-1 に示すようにマイクロフォンを利用したセンサー、Digital Audio Interface ならびに PC からなるものである。まずマイクに関しては、単一指向性、感度-58dB±2dB(1kHz)のダイナミックマイクを、40×40×30 の鋼製の台座に半埋め込み式に固定し、周囲からのノイズの混入を極力防止するため発泡スチロールのカバーを装着したものをを用いている。埋め込み深さについては、5mm と 15mm の2種類を

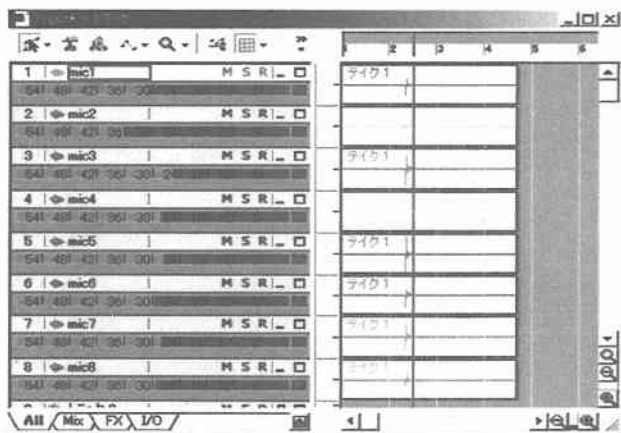


図-3 音響測定時の PC 制御画面

用意して比較検討を行うものとする。写真-2 に使用するマイクを、図-1 にセンサーとして利用する際の構造図を示す。また、図-2 は入力周波数に対するマイクのゲインである。次に、Digital Audio Interface はこのシステムの中核をなすものであり、本研究では写真-3 の Roland 社製 DA-2496 を採用した¹⁴⁾。DA-2496 は、8Ch のオーディオ同時入出力に対応しており、8 系統の異なる音響データを個別に録音可能である。AD 変換は 24bit フォーマットで、サンプリング・レートは 22.05~96kHz に対応しており、非常に高音質のデジタル録音/再生を実現できる。また、PC 上のアプリケーションを用いずとも、直接リアルタイム・モニタリングも行える機能も有している。PC との接続は PCI バスを介して行われるが、16Ch まで拡張することも可能であり、ある程度広い用途に適用することができると思われる。さらに、計測用アプリケーションには、同じく Roland 社製の SONAR 2.0 を用いることとした¹⁴⁾。これは本来音楽製作ソフトウェアであるが、チャンネル毎の個別録音が可能なこと、24bit フォーマットならびに 96kHz までのサンプリング周波数に対応していること、また MIDI や wave、あるいは MP3 等の各種ファイル形式での保存もサポートしているため、本研究の範囲では十分な機能を有していると判断される。図-3 に、音響測定時の PC 制御画面を示す。

3. 実験ならびに解析手法

前述のとおり、本研究ではセンサーの性能確認とシステムとしての適用性等の検討を主な目的としているため、図-4 に示す簡易な実験供試体を製作して音響測定を行った。本供試体は、65×15×900 の平鋼に支承としてΦ25 の丸鋼を溶接したものであり、これにセンサーの台座をエポキシ系接着剤で固定して各種実験を実施した。実験内容は、発泡スチロール製カバーの外部音遮断性の検討、マイクの埋め込み深さの比較、打音、純音ならびに 0Hz~5000Hz までのスイープ音の供試体への入力に対する計測を行った。

音響特性等の把握のための解析手法には、フーリエスペクトルならびにサウンドスペクトログラムを用いている。ここで、サウンドスペクトログラムとは、音響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¹⁵⁾。計算方法は、デジタル音

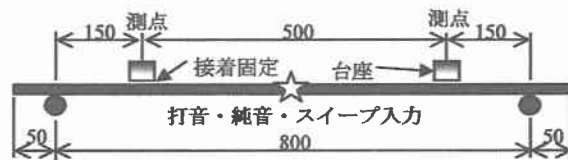


図-4 実験供試体

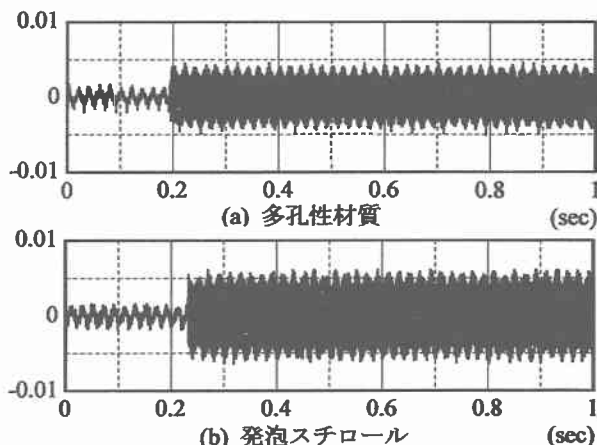


図-5 遮音性比較結果 (2000Hz 純音)

響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。時間の分割は、任意に設定することが可能であるが、フーリエ変換を行うデータ長の半分程度に設定するのが一般的である。本研究では、フーリエ変換を行うデータ長を 1024 個 (約 0.023 秒)、時間間隔をおよそ 0.011 秒に設定し、窓関数には Kaiser ウィンドを適用して計算を行った¹⁶⁾。なお、スペクトルと色調の関係については RGB の色度で表現され、スペクトルが最大の場合 (本研究の解析条件では絶対値で約 8.0)、赤(R)の 255、最小の際 (スペクトルがほぼ 0) のときは青(B)の 255 で表される。これらの解析には、音響データを wave ファイルで保存した後、MATLAB で直接データを読み込み、所定の解析を実施した。

4. 実験・解析結果およびその考察

まずカバーの遮音性に関しては、通常の発泡スチロールと多孔性のものの 2 種類について検討を行った。一定距離から 2000Hz の純音を放射した場合の結果を図-5 に示す。両者を比較すると、明らかに多孔性材質のカバーの方が空気伝播音の遮音性に優れていることがわかる。この際の最大入力レベルは、通常のものは -42dB、多孔質のものは -46dB となっており、このことから両者の性能差が確認された。なお、遮音カバーを設置しない状態でマイクを空气中に露出した場合に対しての入力レベルとしては、500Hz の純音で -20dB、2000Hz で -32dB、5000Hz で -34dB という結果が得られ、ノイズ除去に対して十分な効果が確認された。

次に、埋め込み深さについて考察を加えると、図-6 に示すように深さ 5mm の方が 15mm のものより入力レベルは小さいものの、ノイズも低く抑えられており、有意信号が相対的に大きくなる傾向が見られる。これは、打音に対する場合で顕著に見られ、サウンドスペクトログラムからも分かるとおり深さ 5mm のセンサーがより広い振動数の範

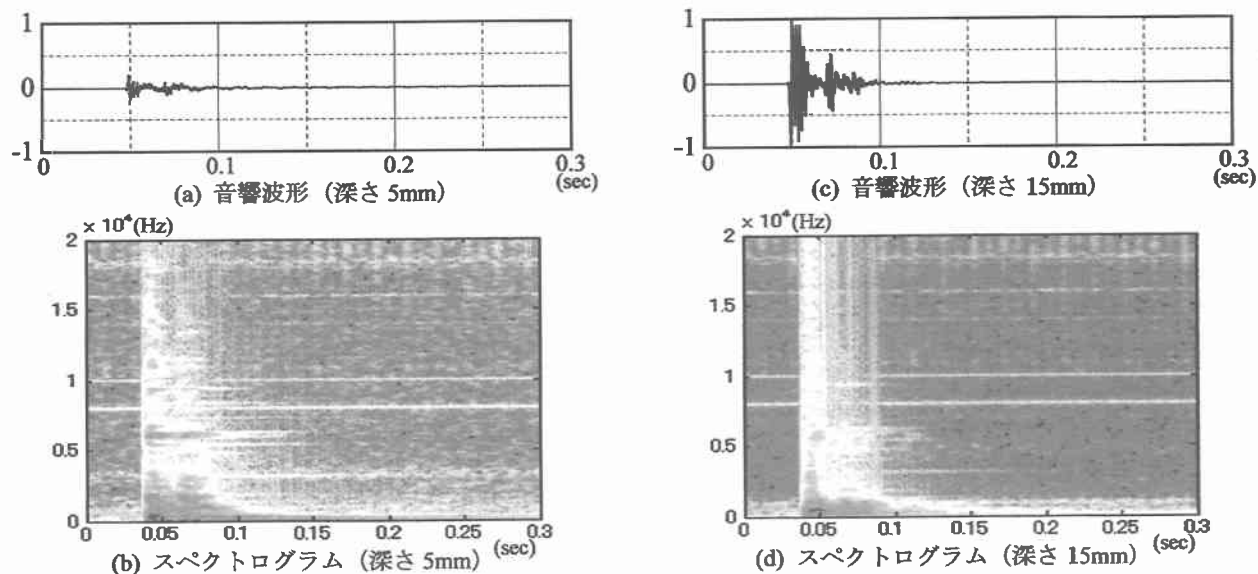


図-6 鋼製台座比較結果 (打音)

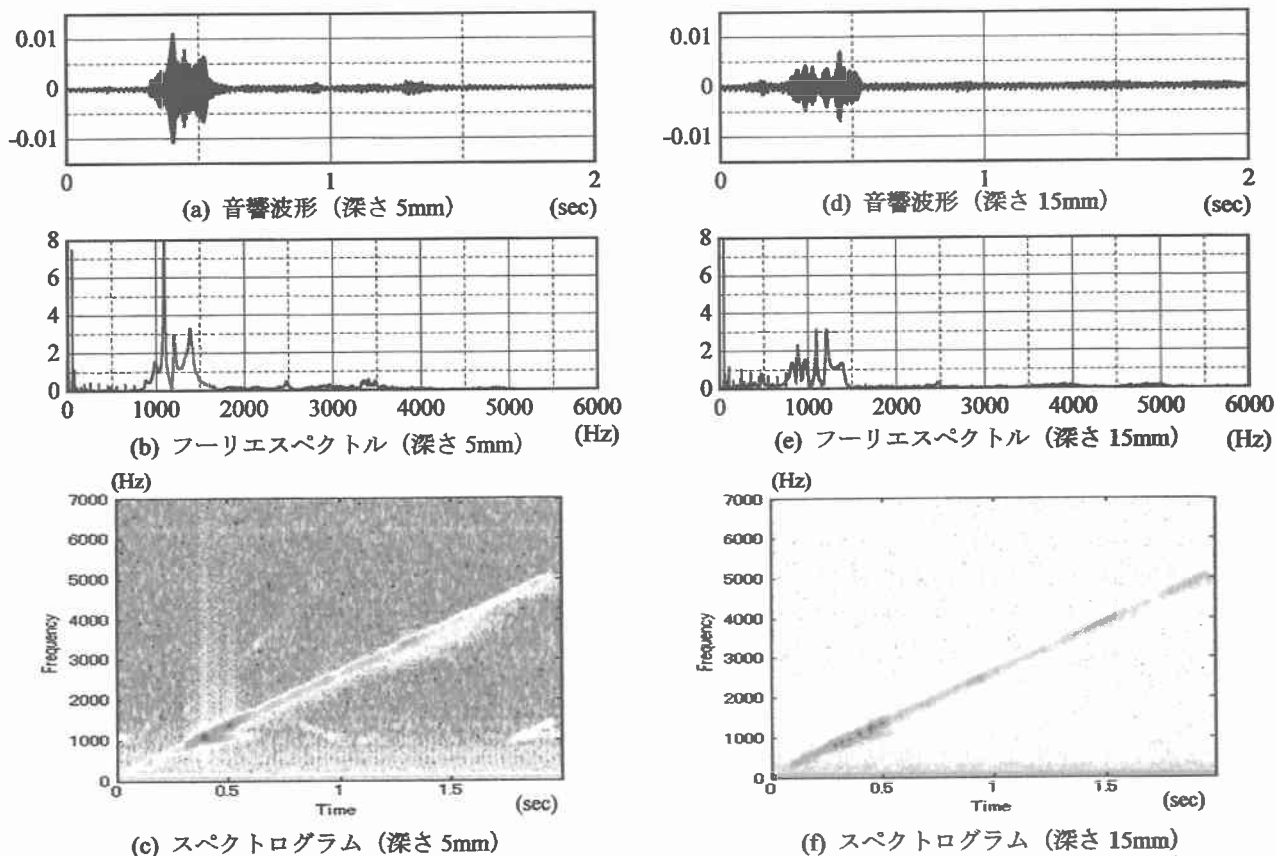


図-7 スイープ音入力結果

囲で有意信号を捉えることが判明した。このような差異が生じた理由としては、埋め込み深さを深くした場合には、台座を伝わる音響信号がマイクと壁面の接触部分から直接入力される可能性が考えられ、全体としてノイズが大きくなるような傾向が生じたものと推定される。

図-7はスイープ信号を入力した場合の結果である。測定結果からは、高振動数になるに伴い徐々に測定感度が低下するが、概ね 4000Hz 程度までは十分と思われる入力を得られている。これは、入力波形を作成する際に波形の振幅

を一定とし、SPL としての調整を行わなかったため高振動数帯域では感度が低下したものであろう。この場合においても、深さ 15mm のものは特に 1000Hz 程度以下においてかなりのノイズ成分が含まれており、センサーとしては埋め込み深さ 5mm が適していると判断される。

以上の結果より、本研究の音響測定システムは鋼構造物内を伝播する音響の変化を捉えられる可能性を有するものと推定され、損傷同定等のためのデータ収集に適用でき得るものと思われる。

5. あとがき

以上のように本研究は鋼橋の損傷同定あるいは健全度診断に用いるための、音響モニタリングシステムについて検討を加えたものである。

実験結果からは、まず空気伝播音の遮断についてはマイクのカバー材の検討を行い、多孔性の発泡スチロールを用いればある程度十分な遮音性が得られることが判明した。空気中に露出したマイクとの比較においても、外部からの騒音の入力はよく抑制されていると考えられ、少なくとも実験室レベルでは有効なセンサリングが可能であると判断できる。また、埋め込み深さの比較に関しては、深さ5mmとした場合が全般的性能の向上を見込めるような結果が得られた。

加えて、打音あるいはスイープ信号を入力した場合の結果からは、概ね4000Hz程度までのかなり広い振動数の範囲において有意信号を測定することができると考えられ、音響測定システムとしての信頼性・適用性は比較的高いと推定できる。

問題点としては、実際の橋梁等をモデル化した供試体を用いて、健全・損傷を設定して実験を行い、音響測定システムとしての適用性を検討あるいは確認する必要があると思われる。さらに損傷に起因する有意な変化を捉え、定量的な損傷同定を行える実用的かつ汎用的なシステムを開発することが今後の課題である。

【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) 土木学会：橋梁振動モニタリングのガイドライン，土木学会，2000.
- 3) 近藤一平，濱本卓司：振動台実験のランダム応答データを用いた多層構造物の損傷検出，日本建築学会構造系論文集，第473号，pp.67-74，1995.
- 4) 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.

- 5) Kato, M. and Shimada, S.: Vibration of PC Bridge during Failure Process, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.112, No7, pp1692-1703, 1986
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 宗像康一，三好敏晴，濱本卓司：2軸偏心を有する多層建築構造物の鉛直・水平2段階損傷検出～その2 振動台実験による損傷検出の検証～，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.403-404. 1998.
- 9) 西村昭，藤井学，宮本文穂，加賀山泰一：橋梁の損傷評価における力学挙動の有効性，土木学会論文集，No.380/I-7，pp.355-526，1987.
- 10) 小幡卓司，植田康平，林川俊郎，佐藤浩一：鋼橋の損傷同定における音響データの適用性に関する一考察，鋼構造年次論文報告集，第8巻，pp.611-616，2000.
- 11) 小幡卓司，植田康平，林川俊郎，佐藤浩一：1/fノイズの分析に基づいた鋼橋の損傷同定に関する一考察，土木学会北海道支部論文報告集，第57号，pp.104-107，2001.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) ローランド・ホームページ，製品情報，<http://www.roland.co.jp/products/index.html>
- 15) 吉井貞熙：デジタル音声処理，東海大学出版会，1985.
- 16) The Math Works Inc.：MATLAB Signal Processing Toolbox User's Guide，サイバネットシステム株式会社，1999.