

音響モニタリングシステムを用いた鋼橋の損傷同定について

Study on damage identification of steel bridge superstructures by using of sound monitoring system

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 葛西祐介 (Yusuke Kasai)
 北海道大学大学院工学研究科 F 会員 林川俊郎 (Toshiro Hayashikawa)

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、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、今日では壮年期にあり、その老朽化は今後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等の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から、今後は維持管理ならびに補修・補強を強化して、既存橋梁の長寿命化の実現が大きな課題となっている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への対応は、困難であると判断せざるを得ない。よって、この問題解決には橋梁の損傷度・健全度診断に用いる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確立することが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⁾。近年では振動・音響の計測は計測装置あるいは解析技術の著しい進歩から、手軽に高速かつ高精度で実施することが可能となってきた。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、鋼構造物内を伝播する波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、著者らが開発した音響モニタリングシステムについて、様々な条件下(損傷位置、加振位置、実験供試体の相違等)における測定と解析を行い、本研究において提案する手法の妥当性、実用性等に関して検討を加えることを目的とする。

具体的には、まずダイナミックマイクをセンサーとした、Digital Audio Interface と PC からなる最大 8Ch までのデータ収録が可能な音響モニタリングシステムを用いて、2 種類の実験供試体に対して仮想的な損傷を与え、構造物内を伝播する音響の測定を行った。次に、得られたデータのサウンドスペクトログラムを算出して、周波数特性を把握し、その結果を時系列の画像データとして記録して、フラクタル次元解析を行った。これらのサウンドスペクトログラム



写真-1 モニタリングシステム

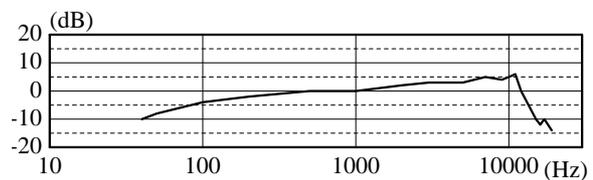


図-1 入力周波数に対するセンサーのゲイン

あるいはパラメータとしてのフラクタル次元について、健全・損傷状態に関して比較検討を行い、鋼橋の損傷同定あるいは健全度診断における音響モニタリングデータおよびその解析手法適用の有効性・実用性等に関して考察を加えた。したがって、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の鋼製の台座に埋め込み深さ 5mm で固定し、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。図-1 は入力周波数に対するセンサーとしてのマイクロフォンのゲインである。また、Digital Audio Interface は Roland 社製 DA-2496 を用いている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。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

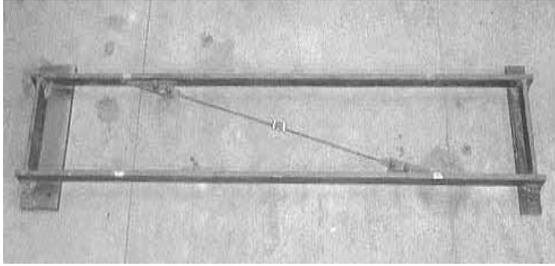


写真2 供試体1

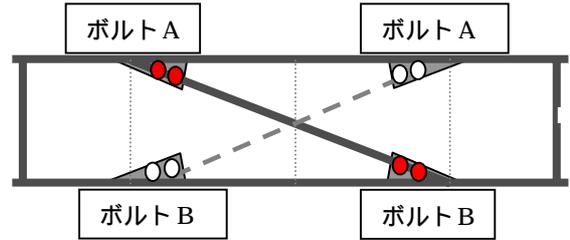


図-2 供試体1



写真-3 供試体2

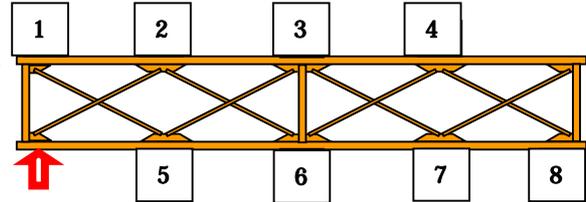


図-3 供試体2 センサー位置

表-1 部材諸元 (供試体1)

部材	l × h × b(mm)	
主桁	平鋼	2500×65×22
横桁	平鋼	400×65×22
横構	平鋼	1120×21×4

表-2 部材諸元 (供試体2)

部材	l × h × b(mm)	
主桁	平鋼	4800×125×60
横桁	平鋼	600×125×60
横構	L型鋼	1200×25×25×3

表-3 実験ケース番号

ケース No	供試体 No	仮想損傷位置
1	1	ボルト A
2	1	ボルト A'
3	2	ボルト 2 (加振点側)

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で、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。

3. 実験ならびに解析手法

3.1 実験方法

本研究で用いた実験供試体は、橋梁構造物の横構と主桁1パネル分を模した部分模型(以下、供試体1と称す)と、実橋全体(以下、供試体2と称す)を模した供試体の2種類を用いている。写真-2に供試体1を、写真-3に供試体2を示す。また表-1に供試体1諸元を、表-2には供試体2諸元を示す。なお、仮想的な損傷状態は、格点における高力

ボルトの締め付けトルクを変化させることによって行った。すなわち、240Nmを健全状態とし、40Nm毎に200Nm~0Nm(がたつかない程度に手で締め付け)まで変化させ測定を実施した。

実験方法は、まず供試体1では支間中央に鋼球による打撃をそれぞれの主桁に与え、図-2のボルトAのトルクを変化させ測定を行う。次に横構をボルトA'およびB'に連結し直し、それぞれのフラクタル次元が同様の傾向を有するか否か等の検討を行った。また、供試体2においては、供試体1と同様に損傷位置とフラクタル次元の変化についての検討に加え、打撃位置と損傷までの距離、あるいはセンサー配置と損傷位置の関係等についても考察が可能となるような測定を行った。図-3に供試体2のセンサー配置を、表-3に実験ケースを示す。

3.2 解析手法

本研究においては、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。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⁾。図-4にこれを示す。計算方法は、デジタル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

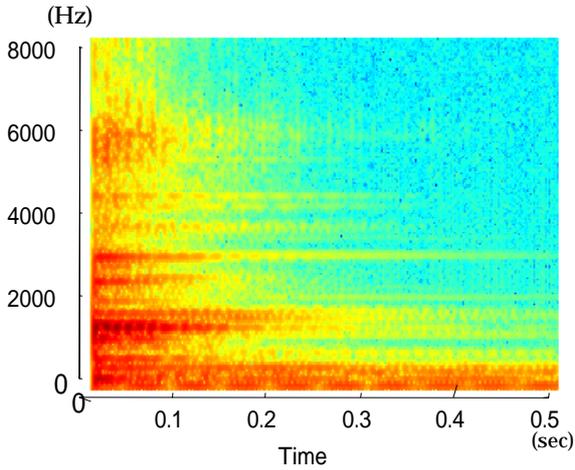


図-4 サウンドスペクトログラム

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。

次に、音響データあるいはその他の時系列データにおけるフラクタル次元の応用に関して言及すると、例えばこのようなデータのパワースペクトル等の応答特性において、そのピークを結ぶ曲線がべき分布を示す場合が多く知られており、これを $1/f$ ノイズあるいは $1/f$ ゆらぎと称している。一般に、この $1/f$ ノイズは時系列データのフラクタル性を表現しており、時間軸で応答を表した場合の 2 次元的なフラクタル次元と同義である。この $1/f$ ノイズは楽器等の音響特性を示すような場合に用いられることがしばしばある。本研究では、画像データとしてのサウンドスペクトログラムに対して、波形としての 2 次元的なフラクタル性を求めた $1/f$ ノイズに加えて減衰特性も含めた形で 3 次元的なフラクタル次元を求めることにより、その変化を捉えて損傷の影響を評価しようとするものである。フラクタル次元の算出に際しては、写真等の画像データに高い適用性を有するボックスカウンティング法を採用して解析を行った。この方法は、まず画像データに対して正方形の被覆を細分化して有意な図形パターンの乗っている被覆の個数を数える。被覆の大きさを変化させた場合の上記の個数を両対数グラフにプロットし、その傾きからフラクタル次元を得るものである。

ここで、図形 X が 1 辺 d の正方形 $N(d)$ 個で覆われているとし、ある定数 k_0 および正の定数 μ において、任意の 1 辺に対し正方形の個数 $N(d)$ を測定すると、 $N(d)$ と d^{-k_0} の間に比例関係、

$$N(d) = \mu \cdot d^{-k_0} \cdot \dots \cdot \dots \quad (1)$$

があれば、式(1)の自然対数をとることにより、

$$\log N(d) = -k_0 \log d + \log \mu \cdot \dots \cdot \dots \quad (2)$$

となり、 $\log N(d)$ と $\log d$ の関係は、

$$y = -k_0 x + \log \mu \cdot \dots \cdot \dots \quad (3)$$

のような直線の式で示される。1 辺の長さ d とその正方形の個数 $N(d)$ を測定したとき、 $\log N(d)$ と $\log d$ の関係との間に、傾き $-k_0$ の直線の間接関係を有していれば、 k_0 は図形 X の正方形の細分によるフラクタル次元と定義できる。

以上より、本研究では損傷レベルに対する定量的な評価を試みるため、サウンドスペクトログラムを時系列の画像

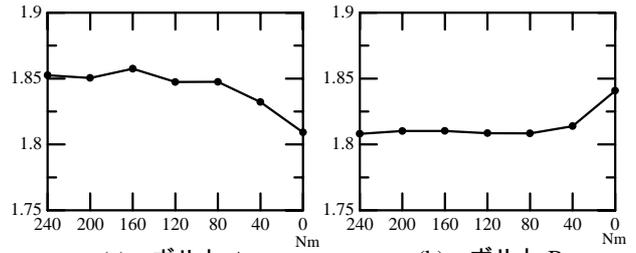


図-5 フラクタル次元 (ケース 1)

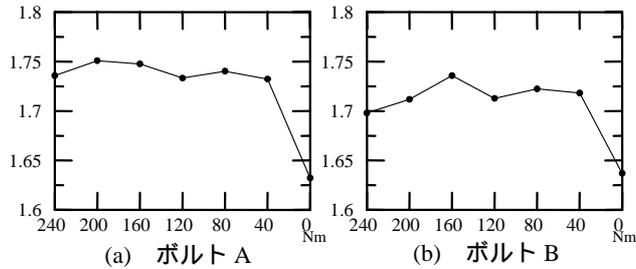


図-6 フラクタル次元 (ケース 2)

データとして記録し、そのフラクタル次元を求めることにより、その変化を捉えて損傷位置の同定等を行うパラメータとして用いている。

4. 実験・解析結果およびその考察

まず、供試体 1 についてはケース 1 およびケース 2 を比較すると、損傷を与えたボルト A および A' のマイクにおける結果では、マイクの設置状況の差異などによって絶対値に差が発生しているものの、損傷の増大に伴ってフラクタル次元が減少傾向を有することがわかる。健全状態である 240Nm から 120Nm 程度までは、フラクタル次元はほぼ一定となっているが、損傷がさらに進行した 80Nm、40Nm、手締め状態ではフラクタル次元が減少しており、実際に 2 次部材等に生じる損傷を考慮すれば、十分に損傷の影響を把握できるものと推定できる。また、A に比べて A' の手締め状態のフラクタル次元が 40Nm よりも著しく減少しているのは、ケース 2 の手締めの程度が弱かったためと考えられる。一方、加振点に近いボルト B および B' に設置されたセンサーのフラクタル次元では、明確な減少傾向は確認できず、ばらつきが目立つ結果となった。これは、加振点に近く損傷箇所から離れているために、ボルト A および A' に与えたボルト弛緩による損傷の影響を捉えにくかったものと考えられ、その結果フラクタル次元にばらつきが生じたものと思われる。

次に、図-6 に供試体 2 についての各点におけるフラクタル次元の変化を示す。供試体 1 で確認されたように、損傷箇所の近傍に設置されたセンサーでは 120Nm から 80Nm でフラクタル次元が減少し始め、手締め状態まで減少する傾向を有している。また損傷箇所の近傍以外での測定点では、損傷が最大となる 40Nm から手締め状態での減少はいくつかの点で確認できるが、平均的にはばらつきが大きく生じる結果となった。とりわけ加振点に近い測点 5 や損傷箇所からかなり離れた測点 7、8 ではばらつきが目立つ結果となっている。

以上の実験・解析により、フラクタル次元解析を適用することで、サウンドスペクトログラムに見られる周波数応

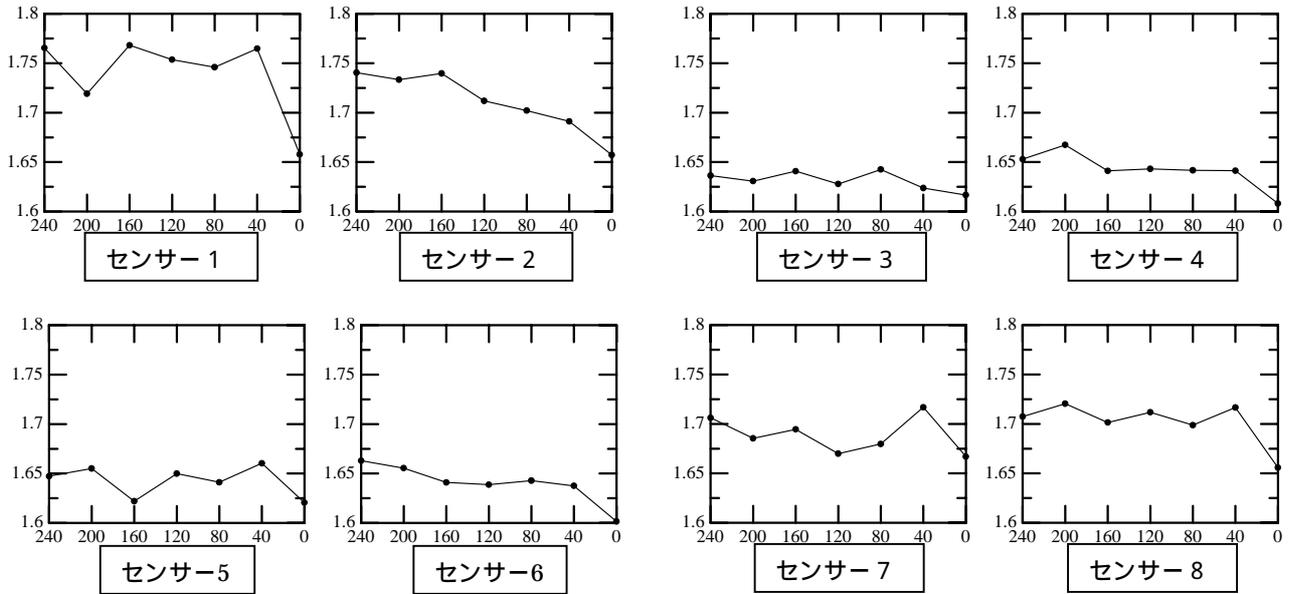


図-7 フラクタル次元(ケース 3)

答などの時間的な変化を数値的に把握することが可能であるものと考えられ、社会基盤鋼構造物に対する損傷度、健全度に定量的な評価に用いることも十分期待できると思われる。また、損傷箇所の近いセンサーほど損傷の影響を捉えやすいと考えられることから、損傷箇所の位置同定を行うこともある程度可能であると推定される。

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、損傷箇所に近い測点において、フラクタル次元は損傷の増大に伴って減少傾向を有することが判明した。この結果より、鋼構造物に対する損傷度、健全度の定量的な評価に用いることも十分期待できると思われる。また、損傷箇所から離れた測点においては、フラクタル次元にばらつきが目立つ結果となったが、損傷箇所に近いほど上述の減少傾向が顕著となっており、このことから、損傷箇所に近いほど損傷の影響を捉えやすいと考えられ、損傷箇所の位置同定を行うこともある程度可能であると推定される。

以上の結果から、社会基盤施設の音響モニタリング結果に対してフラクタル次元解析を適用すれば、従来の手法よりも、より詳細な損傷度評価に十分適用することが可能であるものと考えられ、今後さらに研究を行うことにより、その有効性あるいは実用性も十分に期待できると思われる。

【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) 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，サバ ネットシステム株式会社，1999.