

鋼橋の損傷同定におけるフラクタル次元解析の適用性について

Study on Applicability of Fractal Dimensional Analyses for Damage Identification of Steel Bridge Structures

北海道大学大学院工学研究科○学生員 植田康平 (Kouhei Ueda)

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、新幹線、高速道路、港湾、空港等の非常に多数の社会基盤施設が建設されてきた。中でも道路橋をはじめとする橋梁構造物は、年々増加する自動車保有台数や貨物輸送車の大型化による交通活荷重が設計時の予測をはるかに超過している場合も少なくなく、近い将来構造物の老朽化が深刻な社会問題となるであろうことが指摘されている¹⁾。従来は、25～35年程度の期間で新橋への架け替えを行う場合も見受けられたが、近年の我が国における経済状態、旧橋取り壊しによる産業廃棄物の処理に関する環境への配慮、あるいは一般の経済活動に対する影響等を考慮すると、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る既存橋梁の長寿命化対策の社会的要求が高まりつつある。構造物の維持管理のための調査・点検に基づく工学的評価・判定の現状は、専ら専門技術者の判断に委ねられる場合がほとんどであり、一般に豊富な知識や経験、高度な熟練を要求されるが、このような技術者の不足、あるいは人件費の高騰等の問題を考慮すると、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非常に重要な課題であることは明白である。このような観点から、土木構造物のみならず、建築・機械工学の分野においても、振動等のモニタリングに基づいた損傷同定手法が盛んに研究されている。

一方、近年における各種センサー、信号処理・伝送および通信に関する技術の著しい進歩に伴い、モニタリングシステムは、遠隔計測、モバイル計測、無人計測等による省力化、低コスト化が実現されつつあり、従来よりも容易かつ高精度に必要なデータを収集することが可能になってきた²⁾。また、構造物や機械部品の健全度検査において、ハンマー等による打音を利用した方法は、古くは蒸気機関車の動輪や、近年ではトンネルのコンクリートの検査まで広く応用されていることで知られている。この方法は、打撃によって励起される振動数範囲に着目すれば、概ね 500Hz 以上の高次振動を対象とした方法と考えることが可能であり、起振力そのものには若干の問題はあるものの、打撃方法やセンサーそのものを適切に選択することによって、対象とする構造物の損傷による影響をある程度簡便に把握することもでき得ると推定される。したがって、このような高次の振動応答からの損傷同定が可能となれば、モニタリングデータの維持管理への適用が容易に実現できる可能性を有するものと考えられる。また、将来的にはスマートモニタリングによる検知・判断および制御機能を全て備えたインテリジェントブリッジの出現も予想されており、このような橋梁システム構築への基礎技術としても、簡便に利用でき得るヘルスモニタリング手法は重要であろう。

以上を踏まえて、本研究では鋼橋の損傷同定あるいは健全

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い、これらの適用の可能性等に関して考察を加えることを目的とする^{3),4)}。具体的には、まず鋼橋の主桁と横構を模した実験供試体を作成し、仮想的な損傷・健全状態を設定して、打撃によって供試体の内部を伝わる音響データを収集した。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可能性、有効性等について考察を試みるものである。

2. 実験供試体および実験手法

本研究で用いた実験供試体は、写真-1に示すような橋梁構造物の主桁と横桁および横構によって構成される部分模型を想定して制作されたものである。この実験供試体の両端は固定支持されており、床面から供試体に伝達する音を遮断するための緩衝材がそれぞれの支点部に配置されている。図-1(a),(b)に本研究で用いた供試体の概略図と各測点を示す。測定に際しては、供試体の5点の測点に測定用マイクを設置して、☆に示された部分を硬質ゴムからなる球体により供試体に対して10cm離れた位置から一定の力で打撃し、マイクに入力された計測データを直接パソコ

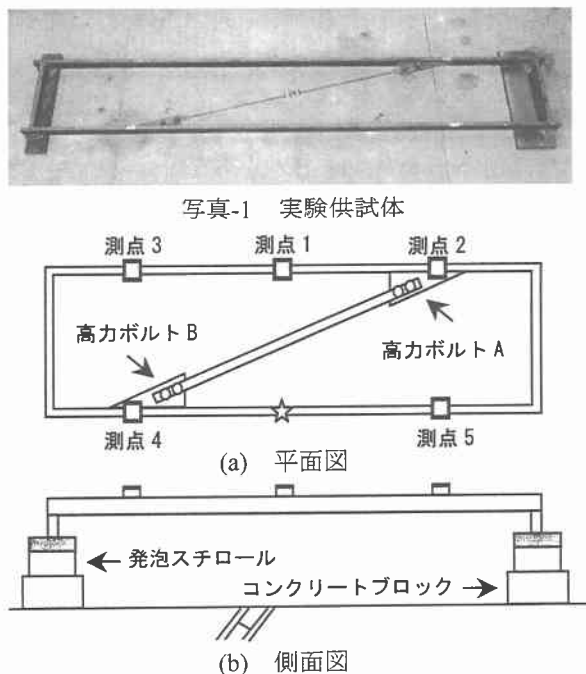


図-1 実験供試体概略図

ンにデジタル録音する。なお、収録の際のデータフォーマットは、16bitモノラルとし、サンプリング周波数は44.1kHzを適用した。

仮想的な健全・損傷状態の設定に関しては、横構端部の接合部における高力ボルトの拘束力を変化させることにより、全てのボルトが締結されている場合を健全状態とし、所定のボルトを弛緩することによって各種の損傷状態を設定する手法を用いた。表-1に、本研究で設定した損傷状態と弛緩させたボルトの位置関係を示す。なお、ヒンジ結合とは、測定中に弛緩させたボルトの拘束状態が変化しない程度に若干のトルクを導入したものであり、また完全解放とは、完全にボルトを弛緩させた状態を意味する。

本研究では、まず実験供試体の状態を表-1のcase1およびcase6に設定して予備実験を実施し、本研究で用いる測定システムの性能確認あるいは適用性等に関して検討を加えるため、データの収録を行った。測点1における波形およびフーリエスペクトルを算出した結果が、図-2(a),(b)ならびに図-3(a),(b)である。

まず図-2(a),(b)の波形に関して、双方とも打音後すみやかに減衰しているが、その程度はcase1よりcase6の方が若干大きなものとなっていることがわかる。この結果は、加速度ピックアップを用いてそのゲインを調整して得られたデータと比較検討を行い、十分な整合性を有することを確認した⁵⁾。また図-3(a),(b)のフーリエスペクトルに着目すると、健全時と損傷時において、例えば500Hz以下の周波数領域で、case6の主な応答成分はcase1よりも小さくなる、あるいは消滅する等の有意な変化を捉えられることが判明した。

以上より、測定された実験データの音響特性等の相違が、供試体の仮想的な損傷の状態に応じて明確に現れているものと判断でき、本研究のような、通常のマイクを用いた音響測定システムを用いることによっても、有効なモニタリングデータを得ることが可能であると考えられる。

3. 解析理論

3. 1 サウンドスペクトログラム

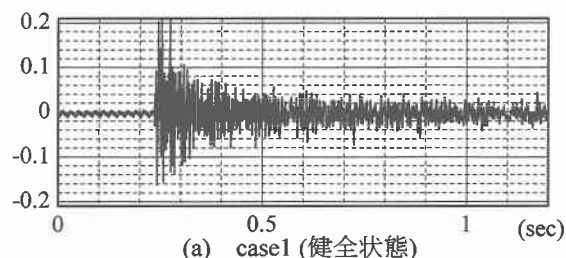
一般に、サウンドスペクトログラム⁶⁾とは、音響スペクトルの時間的な変化を図形の濃淡によって視覚的に判断できるように表示したものであり、色調が濃いほどスペクトル成分が大きいことを意味している。すなわち、サウンドスペクトログラムは音響振動波形のランニングスペクトルを求めて、その強度を色の濃淡で表したものである。通常、これは声紋分析等に多く用いられているが、上述のようにスペクトルの時間的な変化を極めて容易に捉えることができるため、構造物の損傷によるスペクトルの変化の検討にも適用が可能と考えられる。計算方法は、デジタル音響信号に対して適当なデータ点数に分割して窓関数を適用し、離散時間フーリエ変換を行っ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2048個(約0.046秒)、時間間隔をおよそ0.023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。

3. 2 フラクタル次元

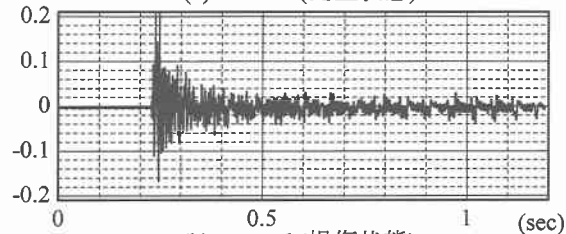
自然界のさまざまな現象を数学的に捉える手法として、フラクタルの概念を適用することが有効な手法の一つであることが知られている。フラクタル^{7),8)}とは、一見して規則性を有するとは思えないランダムなパターンに対して、自己相似性あるいはスケール不変性と呼ばれる概念を導入して、比較的単純な入れ子構造ないしは拡大縮小に関する規則性に関して統一的な記述を試みたものである。そ

表-1 実験供試体の損傷設定

caseNo.	損傷状態	実験供試体の状態
case1	健全状態	全ての高力ボルト剛結
case2	損傷 小	ボルト A ヒンジ結合 B 剛結
case3		ボルト A 剛結 B ヒンジ結合
case4	損傷 中	ボルト A 完全解放 B 剛結
case5		ボルト A 剛結 B 完全解放
case6	損傷 大	全てのボルトをヒンジ結合

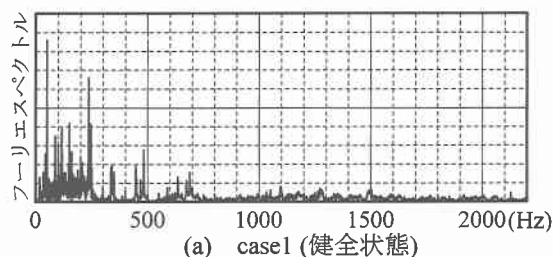


(a) case1 (健全状態)

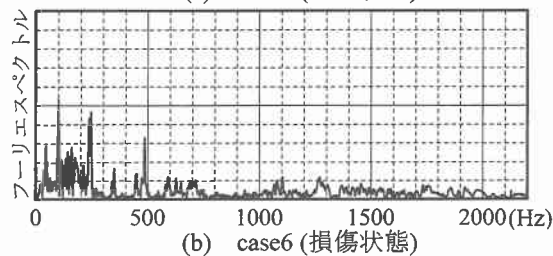


(b) case6 (損傷状態)

図-2 音響波形



(a) case1 (健全状態)



(b) case6 (損傷状態)

図-3 フーリエスペクトル

の定量的尺度としては、フラクタル次元を用いて対象となる図形の複雑さ等を検討するのが一般的である。

そこで本研究では、上述のサウンドスペクトログラムから、時間、振動数およびスペクトルの情報を持つ3次元的なデータに対して直接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による影響の評価を試みるものである。本手法は、それぞれの測定データに対して健全時および損傷時のフラクタル次元を求めることにより、測定された音響データの周波数特性等の変化の情報を個々のスカラー量で得ることができるため、これらの比較・検討からある程度の定量的評価を行える可能性を有すると考えられる。したがって、打音実験によって、構造物の損傷に起因すると考えられる異常音が測定データに含まれた場合、健全時と比較してフラクタル次元に有意な数値的差違が与えられる、あるいは損傷の程度に応じた何らかの傾向を有する可能性が高いものと推定される。

フラクタル次元の算出に際しては、写真等の画像データ

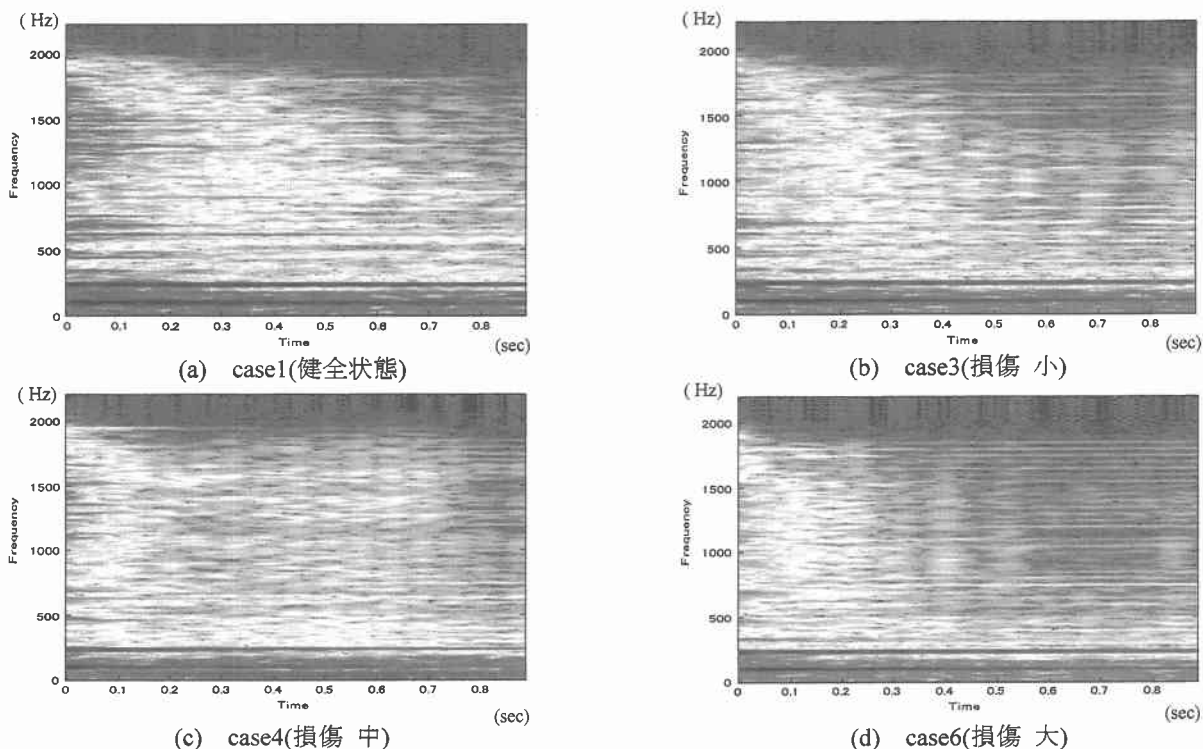


図-4 サウンドスペクトログラム計算結果

に高い適用性を有するボックスカウンティング法 (box-counting 法) を採用して解析を行った。この方法は、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が含まれている被覆の個数を数え、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、

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

があれば、式(1)の自然対数を取ることににより、

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

となり、 $\log N(d)$ と $\log d$ の関係は、

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

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 $-k_0$ の直線の関係の有していれば、 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。

なお、フラクタル次元解析に関しては、特定独立法人畜産草地研究所にて開発されたフラクタル解析システム for Windows95/98 Ver3.2 を用いて、音響解析を一貫して行えるシステムを構築して計算を実施した。

4. 実験結果とその考察

4. 1 サウンドスペクトログラム

以上のような手法を用いて、本研究では打撃実験から得られた測定データに対して、まずサウンドスペクトログラムによって周波数特性を把握し、本研究で使用した供試体における仮想的な損傷との関係について比較検討を行った。実験における損傷状態の設定は、前述の表-1 に示すように、横構を拘束した健全状態(case1)から、横構のボルト全てを弛緩した上で、若干のトルクを導入した損傷状態(case6)までについて測定を実施した。

実験結果の一例として、図-4(a)~(d)に測点 1 における

case1 (健全時)、case3 (損傷 小)、case4 (損傷 中) および case6 (損傷 大) の場合のサウンドスペクトログラムを示す。これら画像の色調を比較すると、case1 から case6 と損傷の程度が増すにつれて、概ね 250Hz 以上における周波数応答成分の継続時間が短くなる傾向を有していることが確認できる。また、およそ 1500Hz 以上の周波数帯に着目すると、case3 および case4 は case1 と比較して、先ほどと同様の傾向を有していると考えられるが、case6 の損傷が極めて大きい場合には、1500Hz 以上の応答そのものがほとんど発生していないことが明瞭に把握できる。著者らの従来の研究においても、サウンドスペクトログラムを用いることにより、その色調から損傷時における定性的な応答の変化は、ある程度把握できる結果が得られており、本研究においても同様の傾向が確認された^{3),4)}。よって、このような音響解析手法を適用することによって、鋼橋の損傷同定あるいは健全度診断等を行える十分な可能性を有するものと思われる。

4. 2 フラクタル次元

以上のように、サウンドスペクトログラムの応用から損傷の定性的判断はある程度可能と思われるが、損傷位置の同定を含めた具体的な損傷度あるいは健全度診断を行うためには、何らかの定量的指標が必要である。本節では、表-1 における case1~case6 の実験結果に対してフラクタル次元を求め、表-2 のように各測点に対する損傷の大小関係 (以下、損傷 level と称す) に応じて整理した上で、フラクタル次元と損傷の大小関係について考察を加えることとする。損傷 level とは、供試体の添接部から離れた測点 1,3,5 は、実験 case と損傷の大小関係は一致するが、添接部直近の測点 2,4 においては近接するボルトの拘束条件を変化させた場合が、より大きい損傷を付加したものと判断できる。ここで、実際のフラクタル次元解析に際しては、解析対象とするサウンドスペクトログラムの画像抽出の時系列範囲を、適切に設定する必要がある。上記を検討するために、本研究では時系列範囲を 0.2sec 間隔で 0.3sec から 0.9sec までの 4 ケースに関して、測点 1 に対して予備的な解析を実施した。その結果、多少のばらつきはあるものの、どのデータ抽出時間においても各損傷 level に対する

フラクタル次元は概ね減少傾向を示し、特に 0.3sec に設定した場合が変化の傾向を最も捉えやすくなることが判明した。よって、本研究においては画像抽出の時系列範囲を 0~0.3sec としてフラクタル次元を求めることとした。

以上のようにして、各測点における損傷の大小関係を整理した上で、フラクタル次元の変化について検討を加えるために、測点毎にフラクタル次元をプロットした結果を図-5(a)~(e)に示す。なお、図-5 中の曲線は、個々に得られたフラクタル次元に対して、最小二乗法によって対数関数近似を行って表示したものである。測点ごとの全体的な傾向は、いくつかの特異点を有するケースがあるものの、すべての測点においてフラクタル次元は概ね減少傾向を示していることがわかる。この理由として、サウンドスペクトログラムで見られたように、損傷が増大するにしたがい、スペクトログラムの画像が単純化し、それに伴って画像データ自体の自己相関性が向上することから、フラクタル次元の低下が生じたものと考えられる。

これらの結果から、フラクタル次元は、サウンドスペクトログラムで見られた健全・損傷時における時系列を考慮した周波数応答特性の定性的な変化を、より具体的かつ簡便に表現しているものと考えられ、それぞれの損傷条件に対して、数値的にある程度有意な差違が生じていることから、対象となる構造物の損傷度あるいは健全度の定量的な評価・検討に用いることができると思われる。

5. あとがき

以上のように、本研究は音響モニタリングデータを用いて、鋼橋の損傷同定あるいは健全度診断を行うためのデータ解析手法に検討を加えたものである。具体的には、実験供試体を用いて打撃による音響データを収集し、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た上でフラクタル次元解析を行い、これらの結果から損傷同定・健全度診断への適用の有効性等について考察を試みた。

まず、サウンドスペクトログラムの解析結果からは、音響データに含まれる周波数応答成分の変化やその減衰特性、すなわち、音響データそのものの「音色」、「残響」等を非常に簡便にかつ視覚的に判断できるものと考えられる。従来の打音による損傷等の検査は、このような音響的变化を人間が耳で聞き分けるものであるが、本研究の手法では、作業者が実際に音を聞き分ける必要はなく、例えば長期モニタリングシステム等を利用したデータに対しても、特別な専門知識をほとんど要求されることなくデータの定性的な評価を実現できるであろう。よって、このような音響解析手法を適用することによって、従来よりも容易に鋼橋の損傷同定あるいは健全度診断等を行えるものと思われる。

フラクタル次元と損傷の程度の関係は、ほぼすべての測点において、多少のばらつきはあるものの、各損傷 level に対するフラクタル次元は概ね減少傾向となることが確認された。したがって、フラクタル次元を用いることにより、サウンドスペクトログラムで見られた周波数応答特性の定性的な変化を、より具体的に技術者が判断しやすい形で表現しているものと考えられ、本研究で設定した仮想的な損傷の範囲では、数値的にある程度有意な差違が生じていることから、橋梁構造物の損傷度・健全度の定量的な評価等に用いることができると推定される。

問題点としては、サウンドスペクトログラムからフラクタル次元を求める際の画像データの抽出範囲によって、得られるフラクタル次元の数値そのものが若干変動する結果となっており、適切な範囲を設定する何らかの指標を導入する必要があると思われる。

最後に、フラクタル次元解析システム使用に関してご許

表-2 損傷 level の設定

損傷 level	測点 1,3,5		測点 2		測点 4	
	ボルト A	ボルト B	ボルト A	ボルト B	ボルト A	ボルト B
level1	—	—	—	—	—	—
level2	○	—	—	○	○	—
level3	—	○	—	●	●	—
level4	●	—	○	—	—	○
level5	—	●	●	—	—	●
level6	○	○	○	○	○	○

— 剛結 ○ ヒンジ結合 ● 完全解放

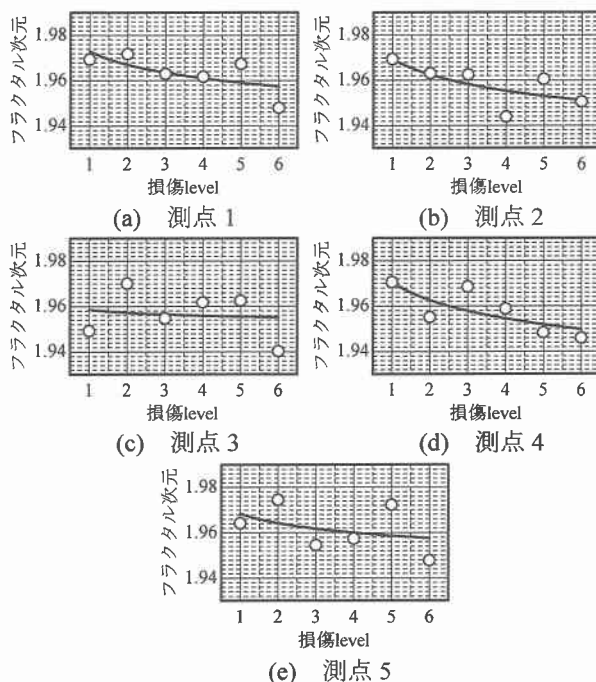


図-5 フラクタル次元と損傷の関係

可頂いた、特定独立行政法人農業技術研究機構畜産草地研究所に対して、ここに記して感謝の意を表する次第である。

【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，pp.4-7，2000.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 小幡卓司，林川俊郎，佐藤浩一，水草浩一：振動モニタリングデータに基づいた鋼橋の損傷同定に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.46A，pp.531-538，2000.
- 6) 吉井貞熙：デジタル音声処理，東海大学出版会，1985.
- 7) 石村貞夫，石村園子：フラクタル数学，東京図書株式会社，1992.
- 8) 今野紀雄：図解雑学 複雑系，ナツメ社，1999.