

ボルト及び水中ポンプの音による簡便な診断方法について

A Simple Diagnosis Method for Bolts and Submersible Pumps based on the Sounds

室蘭工業大学工学部建設システム工学科

正会員 矢吹信喜 (Nobuyoshi Yabuki)

室蘭工業大学大学院工学研究科建設システム工学専攻

○学生員 植田国彦 (Kunihiko Ueta)

1. はじめに

土木建築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。

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。特に視覚が重要なのは言うまでもないが、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点検や診断に際して、コンクリートやボルトをテストハンマーなどで叩くことは、昔から行われている。こうした音響による診断に関する研究^{1) 2)}もなされており、我々も、以前より音によって検査を行うシステム開発に関する研究³⁾を行っている。そこで、本研究では、既開発の音響診断システムを用いボルトナットの打音による締付具合及び水中ポンプの作動状態の検査を行い、異常を検知する指標を導出することを目的とした。

2. 音響診断支援システムによる音響実験

本研究では、音響実験を行うに際し、既開発の音響診断支援システムのプロトタイプシステム(図-1)を用いた。本システムでは、まず、ノートパソコンの録音機能により、点検音診断の対象となる部材の音をWAVEファイル形式で録音する。サンプリング周波数は44.1kHzとした。録音した音の解析には、データ解析プログラミング言語MATLAB⁴⁾を用いた。MATLABにより、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行えるシステムを構築し、ボルトナットの打音実験及び水中ポンプの音響測定実験の解析を実施した。

3. 打音実験

3.1 打音実験の方法

ボルトナットを用いた簡単な打音実験では、ボルトの締付けトルクを徐々に増やして実施した。打音実験に用いる実験供試体として、図-1に示すような長さ約60センチの鋼製板とCチャンネルを2本のボルトにより接

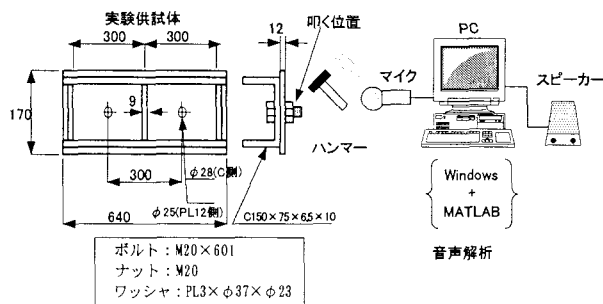


図-1 異常診断プロトタイプシステム

合した供試体を用いた。ボルトはM20×601、ナットはM20を使用した。実験では、ボルトを手の力だけで軽く締めた(手締め)ケース、トルクレンチにて5Nm, 10Nm, 20Nm, 30Nm, 40Nm, 50Nm, 60Nm, 80Nm, 100Nm及び120Nmの締付トルクを加えたケースに対して、テストハンマーにより、図-1に示すようにナットの角の部分に打撃を加え、打撃音をノートパソコンにて録音した。

3.2 打音実験結果

ノートパソコンで録音したボルトを手の力だけで軽く締めたケース、20Nm, 60Nm, 100Nm及び120Nmの締付けトルクを加えたケースの波形及びフーリエスペクトルを図-2に示す。

図-2の波形より、十分な締付けトルクを加えた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。また、フーリエスペクトルから、暗騒音では、若干卓越した周波数が2,200Hz, 3,600Hz, 6,000Hz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。20Nmから120Nmのフーリエスペクトルでは、締付けトルクが増すにつれ2,000Hz付近から5,000Hz付近へと徐々に卓越した周波数が高周波成分に変化することが確認できた。

さらに、定性的には手締めのケースは「にぶく、くぐもった音」、締付けトルク120Nmのケースは「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

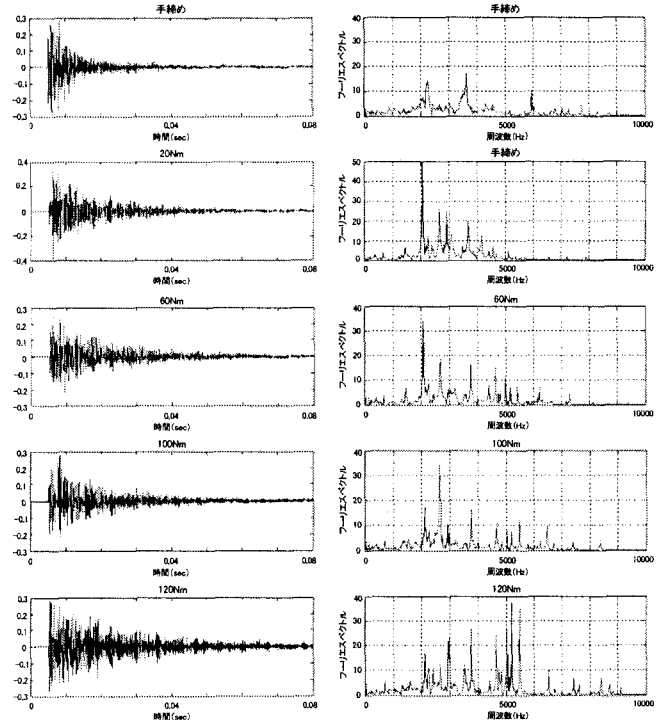


図-2 打音解析結果

る。図-2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。

3.3 ボルトの緩みを感知する指標

本研究では、ボルトの緩みを感知する指標として、波形減衰図(図-3)に示す初期の最大振幅 a が、1/10に減衰するまでの時間 T を減衰時間として設定した。

初めに、減衰時間 T がボルトの叩き方の強弱によって変化しないかを調べるため、ボルトの叩き方に強弱をつけ減衰時間の変化を調べた。図-4に締付けトルク120Nmのケースの最大振幅 a の変化による減衰時間 T を示した。図-4より、締付けトルク120Nmのケースの減衰時間 T は、ほぼ一様であることが確認できた。また、締付けトルク20Nm及び60Nmのケースでも減衰時間 T は、ほぼ一様であったことから、本研究で用いた実験供試体では、減衰時間 T はボルトの叩き方の強弱を変えても変化は少ないと考えられる。

そこで、手締め、5Nm、10Nm、20Nm、30Nm、40Nm、50Nm、60Nm、80Nm、100Nm及び120Nmの締付トルクを加えた各ケースの平均減衰時間 T を図-5に示す。図-5から締付けトルクが増すに従い、減衰時間 T も増加する傾向があることが確認できる。この実験に用いた実験供試体については、

$$T > 0.05 \text{ s}$$

であれば、ボルトの締付けは十分であり、逆に

$$T < 0.04 \text{ s}$$

であれば、締付けが不十分の可能性を示唆しているといえる。

また、フーリエスペクトル図において、周波数帯をいくつかに区切って、各区間のスペクトルの振幅の合計値の比較を行った。周波数帯としては、0・1,000Hz、1,000・2,000Hz、2,000・3,000Hz、3,000・4,000Hz、4,000・5,000Hz、5,000・6,000Hz、6,000・7,000Hz、7,000・8,000Hz、8,000・9,000Hz、9,000・10,000Hzの10個に分けた。まず、各周波数帯の振幅値の合計を求めた。さらに、0・1,000Hzにおける合計値を1とした場合に他の周波数帯は何倍になるのかを求めた。各締付けトルクにおいて高周波成分がどれくらい十分に締付けた状態(120Nm)と比べて増減しているのかがはっきりとわかりにくいので、さらに、締付けトルク120Nmの各周波数帯の合計値を1とした場合、同じ周波数帯の他の条件の場合、何倍になるのかを計算した(表-1)。

図-2の解析結果と表-1より、フーリエスペクトルの変化が大きかった2,000-3,000Hzと5,000-6,000Hzの周波数帯の変化をそれぞれ図-6、7に示す。

図-6の2,000-3,000Hzの周波数帯では締付けトルク

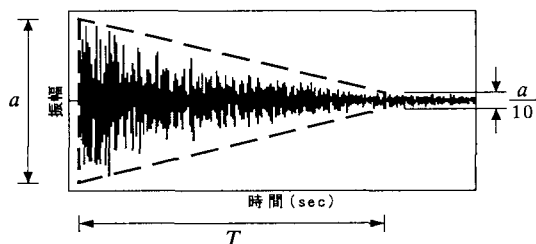


図-3 打音波形減衰図

が大きくなると、フーリエスペクトルの合計値は減少する傾向があることが確認できた。逆に、図-7の5,000-6,000Hzの周波数帯では締付けトルクが大きくなると、フーリエスペクトルの合計値も増加する傾向があることが確認できた。

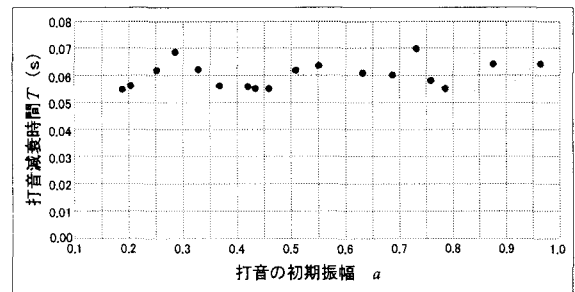


図-4 打音(120Nm)の初期振幅による減衰時間の変化

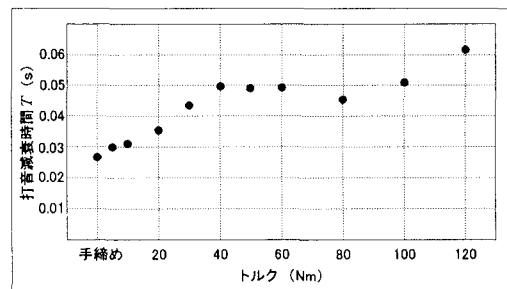


図-5 トルク-打音減衰時間図

表-1 120Nmの各周波数帯の合計値を1とした場合

音データ	0-1,000Hz	1,000-2,000Hz	2,000-3,000Hz	3,000-4,000Hz	4,000-5,000Hz	5,000-6,000Hz	6,000-7,000Hz	7,000-8,000Hz	8,000-9,000Hz	9,000-10,000Hz
手締め	1.00	1.14	2.18	1.05	1.05	0.44	1.16	1.35	0.43	2.68
5Nm	1.00	2.44	2.11	1.61	1.21	0.37	0.74	0.52	0.26	1.00
10Nm	1.00	1.71	3.26	1.21	0.95	1.00	0.75	1.04	0.53	0.64
20Nm	1.00	1.19	2.16	2.10	1.78	0.43	0.98	0.89	0.28	0.56
30Nm	1.00	1.26	1.91	1.60	2.31	0.47	0.57	1.09	0.73	1.00
40Nm	1.00	1.03	1.25	1.08	1.40	0.49	0.63	0.79	0.54	0.44
50Nm	1.00	0.84	1.53	1.36	1.62	0.39	1.49	1.63	0.78	0.60
60Nm	1.00	0.86	1.47	1.30	1.36	0.48	1.64	1.06	0.61	0.72
80Nm	1.00	1.20	1.46	0.91	0.78	0.58	2.81	0.85	0.65	0.56
100Nm	1.00	1.15	1.57	1.01	1.07	0.76	1.67	0.93	1.22	1.32
120Nm	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

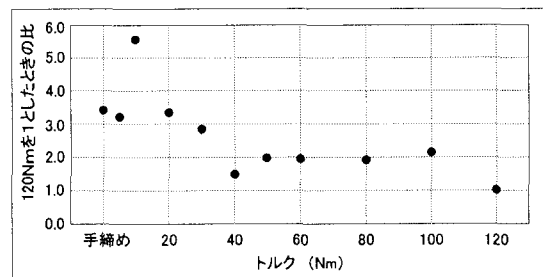


図-6 2kHz~3kHzで120Nmを1としたときの比

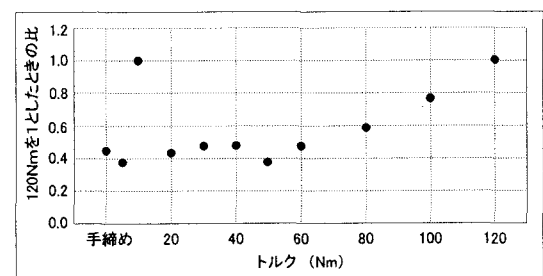


図-7 5kHz~6kHzで120Nmを1としたときの比

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。

4. 水中ポンプ実験

水中ポンプは、土木基礎工事などで地下水や河川からの漏水を排出したり、ダムや地下発電所等における漏水を外部に排出するといった重要な役割を演ずる機器である。しかし、あまり目立たぬ存在であり、壊れれば取り替えれば良いといった認識が一般的であることから、性能劣化状況や故障に関する原因や診断法などに関する研究はあまりされていないようである。

しかし、ダムの監査廊や地下発電所の最下層のピットに設置してある水中ポンプが故障した場合、漏水横溢により各種機器類が被害を受けることが考えられる。また、そうした場所は、頻繁に作業員や技術者が行く場所ではない上に、劣化や異常によるポンプの作動音の変化は少しずつ進むと考えられることから、稀にしか行かない作業員や技術者の耳では、どれくらい劣化したかを音の変化により判断することは極めて困難だと考えられる。さらに、ポンプ類は、比較的長期間壊れず動作することから、劣化を観察することは容易ではない。

4. 1 水中ポンプ実験の方法

本研究では、図-8の水中ポンプ実験装置を用いて水中ポンプの音響測定実験を実施し、水中ポンプの劣化状況を検知する異常検知の指標を導出することとした。実験に使用したポンプ内部には、5枚の羽根を持つ水車がある。音響測定実験では水中ポンプの羽根を少しずつ目詰まりさせたり、羽根の一部を少しずつ破損させていきながら、作動音データを採取した。

羽根を少しずつ目詰まりさせるケースでは、正常な状態における動作音を記録した後、羽根と羽根の間に厚さ3mmのゴム板で作成した異物を瞬間接着剤で貼り付け(図-9)、動作音を記録し、さらにゴムを重ねて貼り付けては、動作音を記録した。3枚重ねると羽根と同じ高さになるので、さらに別の水のルートにゴム板を貼り付けて、実験を繰り返した。

羽根の一部を少しずつ破損させていくケースでは、羽根を一枚ずつ、ペンチで破損させていきながら、動作音を記録した。1枚の羽根の約3分の1を破損させた時の写真を図-10に示す。

4. 2 水中ポンプ実験結果

羽根を少しずつ目詰まりさせるケースと羽根の一部を

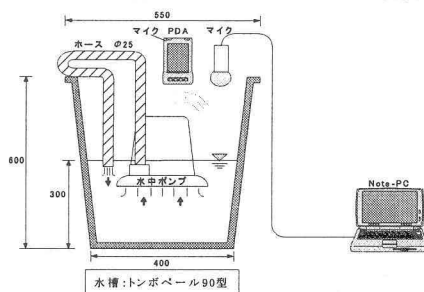


図-8 水中ポンプ実験装置

少しずつ破損させていくケースの波形解析結果を、暗騒音、正常動作時、1枚の羽根の3分の1破損時、3枚完全破損+4枚目3分の1破損時、5枚完全破損時について図-11、12に示す。暗騒音、正常動作時は2ケースとも同様である。

図-11より、目詰りさせるケースでは、徐々に波形が乱れ不規則になっていくのが確認できる。フーリエスペクトルでは、1000Hz以上の周波数成分が多くなることが確認できた。これは、実際に実験において、耳で聞いても、正常時に比べると、羽根を目詰りさせていくにつれ、雑音が混じっていくように聞こえた。

図-12より、破損させるケースでは、3枚完全破損+4枚目3分の1破損時では波形が乱れ不規則になっているが、5枚完全破損時では、波形にあまりノイズ成分がないことが確認できる。同様にフーリエスペクトルにおいても5枚完全破損時では高い周波数成分は少ない。これは、水車の羽根が5枚全て破損している状態のため、実験装置内の水の回転が弱くなったためと考えられる。耳で聞いても、5枚完全破損時には音は小さくなった。

4. 3 ポンプの劣化を検知する指標

羽根を目詰りさせることにより高周波成分がどの程度増えるかを、打音実験と同様にフーリエスペクトル図において、周波数帯をいくつかに分けて、各区間のスペクトルの振幅の合計値の比較を行った。周波数帯としては、0-500Hz、500-1,000Hz、1,000-2,000Hz、2,000-3,000Hz、3,000-10,000Hzの5個に分けた。まず、各周波数帯の振幅値の合計を求め、周波数帯の幅に応じて、一番小さい500Hzに換算した。さらに、0-500Hzにおける合計値を1とした場合に他の周波数帯は何倍になるのかを求めた。羽根を破損していくにつれて、高周波成分がどれくらい正常時と比べて増えているのかがはっきりとわかりにくいので、さらに、正常時の各周波数

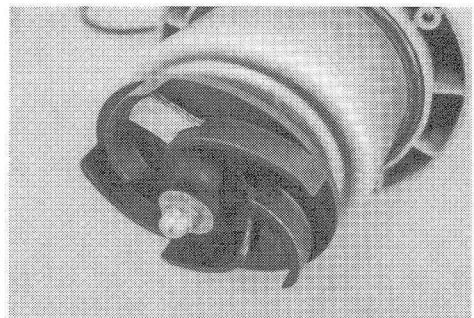


図-9 水中ポンプの羽根の間にゴムを貼り付けた状況

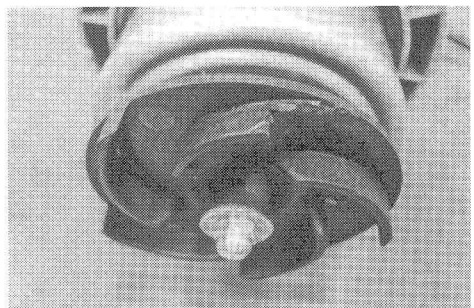


図-10 水中ポンプの羽根の一部を破損させた状況

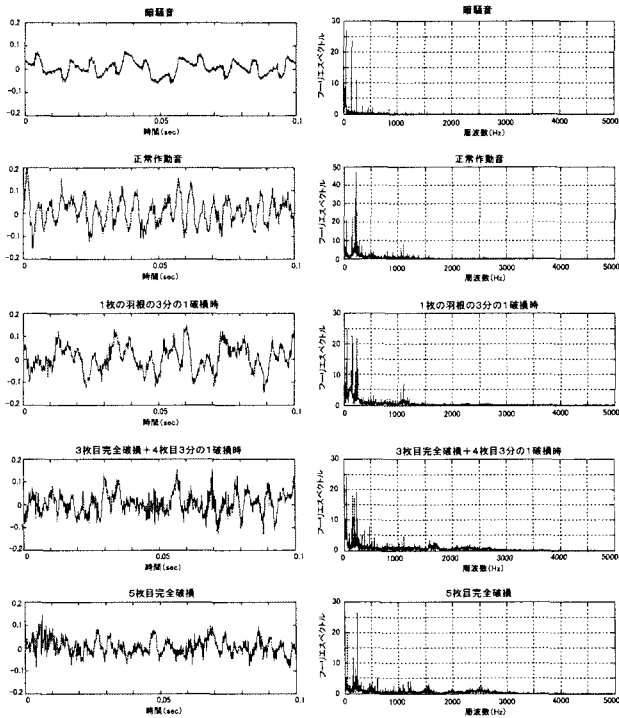


図-1 1 ポンプ実験結果 (目詰り)

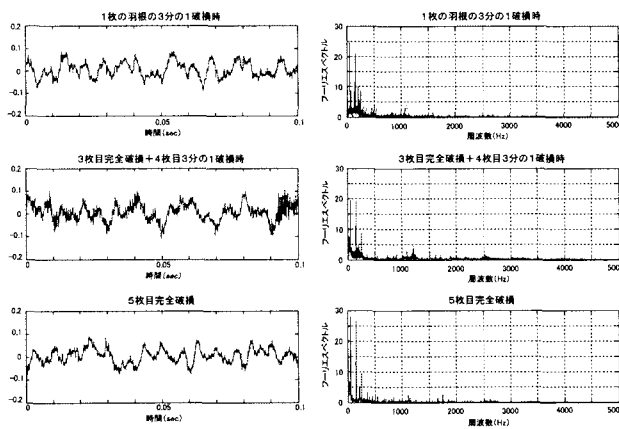


図-1 2 ポンプ実験結果 (破損)

帯の合計値を1とした場合、同じ周波数帯の他の条件の場合、何倍になるのかを計算した(表-2)。

表-1より、徐々に羽根を目詰りさせたケースの1,000・2,000Hzの周波数帯の変化を図-13に示す。同様に、徐々に羽根を破壊するケースの1,000・2,000Hzの周波数帯の変化を図-14に示す。

図-13, 14共に羽根の劣化が進むと1,000~2,000Hzの周波数帯の比率が増加する傾向があることが確認できた。羽根を破損させるケースでは4枚完全破損+5枚の羽根の3分の1破損からは減少傾向であった。この実験に用いた実験装置では、正常作動音を1としたときの比(1,000・2,000Hz) > 2.0であれば、水中ポンプに何らかの異常が生じている可能性があることを示唆しているといえる。

5. まとめ

本研究では、音による診断の対象として、ボルトの打音及びダムや地下発電所等で用いられる水中ポンプの作動音を取り上げ、ノートパソコンを用いて音を収録し、

表-2 正常時の各周波数帯の合計値を1とした場合 (目詰り)

周波数帯 (Hz)	0-500	500-1,000	1,000-2,000	2,000-3,000	3,000-10,000
暗騒音	1.00	0.95	1.01	1.60	2.31
正常時の周波数帯の比	1.00	0.19	0.10	0.04	0.01
正常時	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
羽根1枚目1/3	1.00	1.13	1.31	1.64	1.33
羽根1枚目2/3	1.00	1.15	1.24	1.66	1.53
羽根1枚目3/3	1.00	1.06	1.45	1.93	1.45
羽根2枚目1/3	1.00	1.96	1.81	2.48	1.85
羽根2枚目2/3	1.00	1.93	2.53	3.78	1.84
羽根2枚目3/3	1.00	1.55	2.60	3.78	1.90
羽根3枚目1/3	1.00	1.36	2.09	3.47	1.74
羽根3枚目2/3	1.00	1.47	2.33	3.86	1.54
羽根3枚目3/3	1.00	2.43	4.35	7.99	2.63
羽根4枚目1/3	1.00	1.65	3.06	5.37	1.68
羽根4枚目2/3	1.00	1.67	1.85	2.65	1.70
羽根4枚目3/3	1.00	1.65	3.85	4.75	2.45
羽根5枚目1/3	1.00	1.62	5.30	2.83	2.18
羽根5枚目2/3	1.00	2.15	5.11	4.97	2.36
羽根5枚目3/3	1.00	1.82	7.46	7.75	2.77

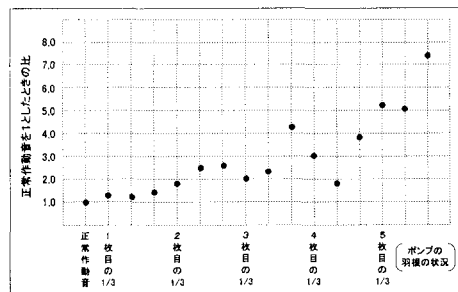


図-1 3 1,000Hz~2,000Hzで正常作動音を1としたときの比 (目詰り)

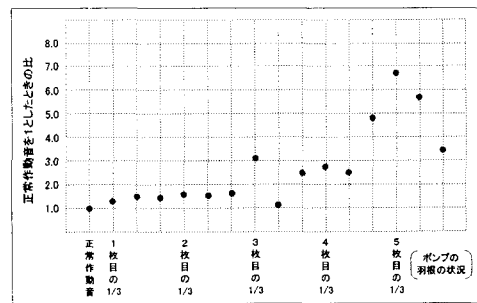


図-1 4 1,000Hz~2,000Hzで正常作動音を1としたときの比 (破損)

解析結果より異常を感知する指標を導いた。実験結果より、本研究で導いた指標は、実際の点検業務にもある程度、使用可能であることがわかった。しかし、点検実務に音響診断を適用させるためには、暗騒音の問題の解決や多くの音データを収集し、より精度の高い指標の導出が求められる。

今後は、より精度の高い実験を行い、実際のダムや地下発電所において長期間、観測することにより、診断の指標を発見していきたいと考えている。

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クタ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) 矢吹信喜，植田国彦，小谷隼：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，土木情報利用技術論文集，Vol.12，pp.257-264，2003。
- 4) MATLAB：http://www.mathworks.com/index.shtml