

# 論文 インパクトエコー法により検出可能なコンクリート中の空隙の大きさと深さについて

川嶋 雅道\*1・鎌田 敏郎\*2・内藤 翔太\*3・六郷 恵哲\*4

**要旨**：インパクトエコー法では、PC 部材におけるシース内の空隙からの反射波による周波数ピークの有無に基づいて、グラウト未充填の判断を行っている。既往の研究において、検出可能な空隙の大きさと深さの関係が示されているものの、未だ不明確な部分が残されている。そこで本研究では、様々な空隙の大きさと深さを対象として、供試体による実験的な検討を行った。その結果、評価に最適なインパクトの鋼球直径を選定する上での考え方を示した。また、空隙検出可能範囲の改善に有効な波形処理や、周波数分析についても明らかにした。

**キーワード**：インパクトエコー法，周波数分析，高速フーリエ変換，マルチテーパ法，表面波

## 1. はじめに

インパクトエコー法は、PC 部材におけるグラウト未充填箇所を検出する手法として活用が期待されている<sup>1)</sup>。この方法では、グラウト未充填箇所をコンクリート中の空隙部分とみなし、表面から空隙までの深さ(PC 部材ではシースの埋設深さ)に相当する縦波共振の周波数ピークの有無から未充填箇所を判断することができる。

しかしながら、本手法では、検出可能な空隙の条件を示した研究成果<sup>1)</sup>はあるものの、いまだ手法の適用範囲が明確になっているとは言い難い。また、空隙の検出性能を高めるための波形処理方法や、周波数分析の手法についても検討の余地が残されている。

そこで本研究では、グラウト未充填箇所が検出可能となる空隙の大きさと深さの条件を明らかにするため、シース直径と埋設深さを変化させた供試体を用いて実験的に検討を行った。実験では、打撃に用いる鋼球の直径の違いにより弾性波の上限周波数を変動させて、スペクトルにおけるピークの出現状況を評価した。また、

打撃に付随して発生する表面波の存在が周波数ピークの出現挙動に与える影響を把握し、表面波の除去操作が結果に与える効果についても検討した。さらに、受振波形の周波数分析に新たな手法を適用し、空隙の検出可能範囲の改善を試みた。

## 2. インパクトエコー法による空隙検出の原理

インパクトエコー法による空隙検出の原理を図-1に示す。この手法は、グラウト未充填による空隙や板厚を、鋼球打撃により得られた周波数分布から検出するものである。その評価にあたっては、周波数分布におけるピーク周波数を活用する。なお、板厚や空隙によるピーク周波数は、以下の式により算出される。

$$f_{\text{板厚}} = V/2T \quad (1)$$

$$f_{\text{空隙}} = V/2d \quad (2)$$

ここで、 $f_{\text{板厚}}$ ：板厚によるピーク周波数、 $f_{\text{空隙}}$ ：空隙によるピーク周波数、 $V$ ：縦波の伝播速度、 $T$ ：板厚、 $d$ ：空隙までの深さである。

\*1 岐阜大学大学院学生 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

\*2 岐阜大学助教授 工学部社会基盤工学科 工博 (正会員)

\*3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 学部生

\*4 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 工博 (正会員)

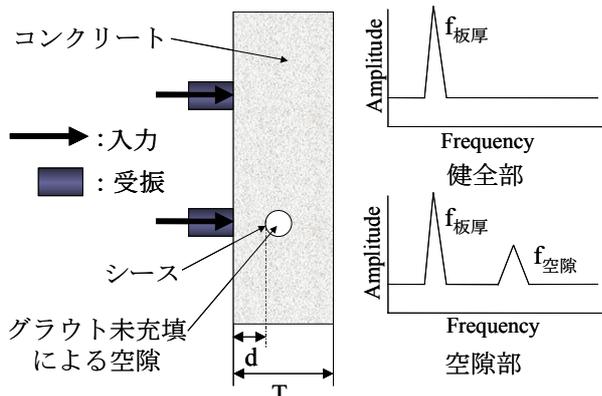


図-1 インパクトエコー法の概念

### 3. 実験概要

#### 3.1 供試体概要

側面からの反射波の影響を避けるため、図-2に示すように、長さと幅を十分大きくし、板厚を500mmとしたコンクリート供試体を作製した。供試体内部には、空隙を模擬するために、φ45、60および90mmのスパイラルシースを埋設した。これ以降、シースの直径を「空隙の大きさ」と呼ぶ。また、コンクリート表面から空隙までの深さを変化させることを目的に、シースの埋設深さが60~250mmへとなるように、供試体長手方向における中央部分にて、5°の角度で斜めに曲げ上げた。シースの埋設深さは、「空隙までの深さ」と表記する。なお、本研究では、供試体作製後、電磁波レーダ法により空

隙までの深さを確認した。その結果、電磁波レーダで推定された空隙までの深さは、60~250mmとなった。これ以降、本論文では、空隙までの深さは電磁波レーダ法により把握が可能であるため、これが既知のものであることを前提として議論を行うこととする。

#### 3.2 弾性波計測方法

入力する弾性波の上限周波数を変化させることを目的に、写真-1に示すように鋼球の直径が異なる10種類のインパクトを用いてコンクリート表面(図-2における上面)を打撃し、弾性波を入力した。入力される弾性波の上限周波数と鋼球直径との間には、以下の関係がある<sup>1)</sup>。

$$T_c = 0.0043D, f_{\max} = 1.25/T_c \quad (3)$$

ここで、 $T_c$ : 接触時間 (s),  $D$ : 鋼球直径 (m),  $f_{\max}$ : 入力される弾性波の上限周波数 (Hz) である。本研究で用いた各インパクトにおける接触時間および上限周波数を式(3)から計算すると、表-1に示す解を得る。

このように入力された弾性波を、コニカル型高感度変位センサを用いて、コンクリート表面(図-2における上面)の変位波形として受振した。受振された変位波形は、サンプリング時間1μsでデジタル化し、パソコン上にデジタル波形として記録した。記録されているデジタル

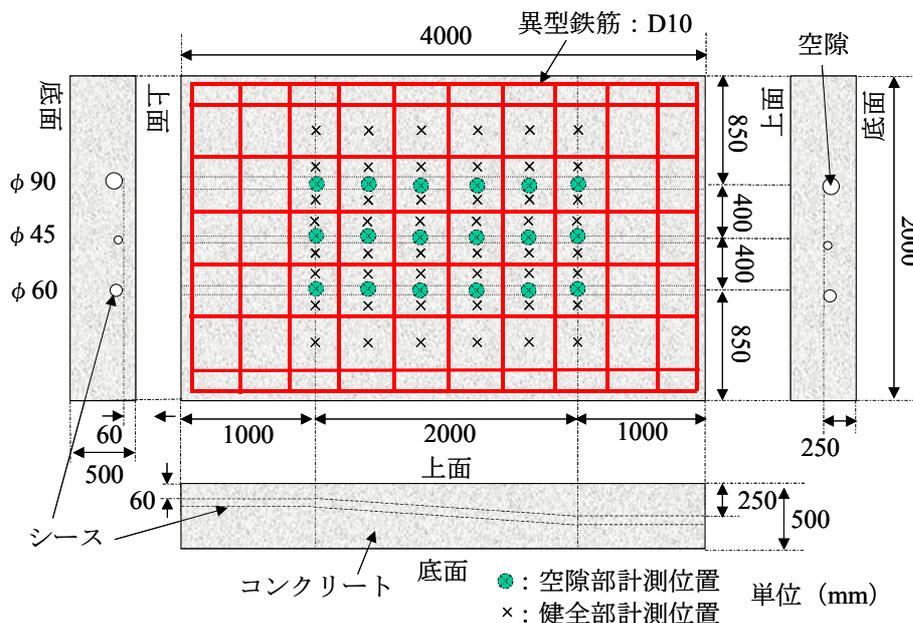


図-2 供試体概要と弾性波計測位置



写真-1 インパクト

波形に対して周波数分析を行い、周波数分布を算出した。本研究で使用した変位センサは、1MHz までの周波数範囲において、ほぼフラットな応答特性を有している<sup>2)</sup>。

空隙部における弾性波の計測位置を、図-2 (図中の●の位置) に示す。図に示す計測位置において、打撃による弾性波の入力と変位波形の受振を、空隙中央部の直上にて行っている。入力位置は、受振位置よりシースの長手方向に沿って 50mm 離れた点である。また、本研究では、空隙部の計測位置は、全て 5° の角度で曲げ上げたシースの直上部分で行っている。そのため、弾性波が入力位置直下の空隙から反射しない可能性が考えられるが、曲げ上げ角度が非常に小さいため、ここではこれらの影響を無視した。なお、健全部における弾性波計測は、シーソおよび鉄筋の直上を避けて行った (図-2 に示す×の位置)。コンクリートの弾性波伝播速度は、健全部における縦波共振周波数から算出した。健全部に相当する複数の場所での伝播速度を算出し、その平均値をとって、3900m/s とした。

表-1 接触時間と上限周波数

鋼球直径(mm)	接触時間(μsec)	上限周波数(kHz)
3.2	13.8	90.8
4.0	17.2	72.7
4.7	20.2	61.9
6.4	27.5	45.4
8.0	34.4	36.3
9.6	41.3	30.3
11.0	47.3	26.4
12.8	55.0	22.7
15.7	67.5	18.5
19.1	82.1	15.2

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 弾性波の入力方法が周波数ピークの出現に与える影響

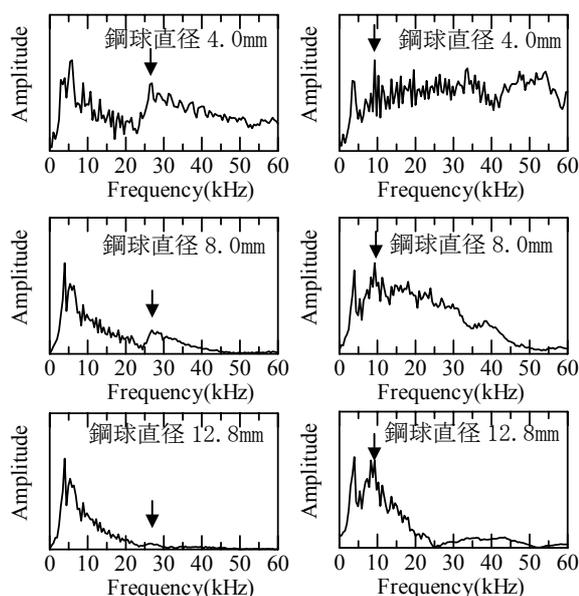
図-3 に、空隙の大きさが 90mm、空隙までの深さが 70mm および 250mm の場合における周波数分布を示す。この図の周波数分布は、高速フーリエ変換 (以降、FFT と呼ぶ) により算出した。また、弾性波の入力には、鋼球直径が

4.0, 8.0 および 12.8mm のインパクトを使用した。なお、空隙までの深さが 70 および 250mm における空隙からのピーク周波数は、式(2)よりそれぞれ 27.85 および 7.8kHz となる。

図-3 (a) において、インパクトの鋼球直径が 12.8mm の場合、入力波の上限周波数は 22.7kHz となる。そのため、空隙からの縦波共振のピーク周波数である 27.85kHz を満足するに至っていない。これによって本図では、縦波共振現象を捉えることができなかったものと考察できる。しかしながら、鋼球の直径が 8.0 および 4.0mm と小さくなるほど、空隙によるピーク周波数が卓越する傾向を示した。これは、空隙による縦波共振のピーク周波数が、入力された弾性波の上限周波数を十分上回っているためであり、著者らが過去に行った研究結果<sup>3)</sup>とも一致する。

しかしながら、図-3 (b) の空隙までの深さが 250mm の場合は、鋼球直径が小さくなるほど、縦波共振によるピーク周波数が、その他の周波数成分における振幅と同程度となり、その判別が難しくなることがわかる。

以上のことから、空隙からの縦波共振現象を的確に捉えるには、入力される弾性波の上限周波数を考慮するだけでなく、図-3 の (a) と (b) とでの比較によって推定できるとおり、空隙に



(a) 空隙までの深さ 70mm (b) 空隙までの深さ 250mm

図-3 上限周波数が異なる場合の周波数分布

よるピーク周波数より3倍程度高い上限周波数を入力できる鋼球直径を選択する必要があることが明らかとなった。なお、その他の空隙の大きさと深さのケースにおいても、同様の結果となった。

これ以降は、上記の条件を満たすようなインパクトを使用した場合の実験の結果について論じる。

#### 4.2 表面波の存在が周波数ピークの出現に与える影響

インパクトエコー法には、受振波が、コンクリート内部の情報に関与しない表面波を含んでいるという原理上の問題点がある。既往の研究<sup>1)</sup>において、表面波は、鋼球直径から算出される接触時間に相当した下方への凸の変位（マイナスの変位）として、受振波形上に現れるとされている。そこで、ここでは表面波の影響を考慮した波形処理を行い、表面波の有無が周波数分布に与える影響について検討を加えた。なお、波形処理の対象は、接触時間と空隙までの深さを考慮して、深さが100~250mmの場合についてのみ行った。これらの結果の一例として、図-4(a)に、空隙の大きさが90mm、空隙までの深さが250mmのケースにおける、波形処理を行う前の受振波形と、FFTを行って算出した周波数分布を示す。弾性波の入力には、鋼球直径8.0mmのインパクトを使用した。また、受振波形は、表面波の判読ができるように、横軸の時間を100~300 $\mu$ sの範囲で示した。この図によれば、既往の研究<sup>1)</sup>と同様に表面波が現れていることがわかる。表面波の継続時間（図中のt）は、図から読みとると約30 $\mu$ sであった。この継続時間は、表-1によれば、鋼球直径8.0mmの場合の接触時間34.4 $\mu$ sとかなり近い値である。

そこで、この表面波の影響を除去するために、表面波に相当する部分と表面波以前の振幅電圧を0Vとする波形処理を行った。この処理を施した後の波形とFFTによる周波数分布を図-4(b)に示す。これによれば、表面波の影響による

ものと考えられる周波数成分が減衰することにより、空隙によるピーク周波数が相対的に卓越し、図-4(a)の場合と比較して、より縦波共振現象を捉えやすくなっていることがわかる。なお、鋼球直径が異なる場合においても、同様の傾向が確認できた。

以上のことから、受振波形において表面波を除去することにより、空隙による縦波共振に伴うピークの有無が判定しやすくなることが確認された。ただし、表面波上に縦波共振現象に起因する周波数成分が混在する場合（本実験ケースにおける空隙までの深さが60~100mmの場合）においては、表面波の取り扱いには注意が必要となる。

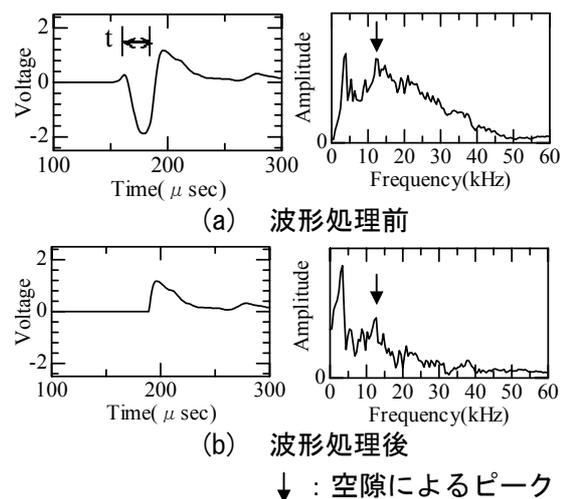


図-4 受振波形と周波数分布

#### 4.3 周波数分析手法の検討

空隙の大きさが45mmと一定で、かつ、空隙までの深さが60mmおよび180mmの場合における、FFTによる周波数分布を図-5に示す。これらの条件における縦波共振のピーク周波数は、それぞれ32.05kHzおよび10.83kHzである。また、この図に示す周波数分布は、4.2に示す表面波の影響を考慮して算出した周波数分布である。インパクトの鋼球直径は、深さが60mmでは4.0mmとし、深さが180mmにおいては8.0mmとした。図-5において、空隙までの深さが60mmの場合は、空隙からのピーク周波数に相当する縦波共振現象を捉えていることがわ

かる。しかしながら、深さが 180mm の場合は、空隙に伴う周波数ピークが、その他の周波数成分に埋もれてしまい、縦波共振が明瞭に把握できるとは言い難い。この理由としては、まず、コンクリート表面から空隙までの深さが大きくなることにより、弾性波の拡散や減衰も大きくなり、これによって空隙からの周波数ピーク成分が低減したものと考察できる。つまり、空隙までの深さが大きい場合、上記の理由から、4.2 に示すような波形処理のみによってピーク周波数の判別を容易にするのは困難であることがわかる。また、図-5 に示す周波数分布は、前述のとおり全て FFT により算出したものである。周波数分析に FFT を用いた場合、空隙によって生じる周波数ピークおよびそれ以外の周波数成分において分散が生じ、結果的に縦波共振の周波数ピークの判読が難しくなる可能性も否定できない。

そこで本研究では、FFT と比較して、スペクトル推定における分散が発生しにくいマルチテーパ法<sup>3)</sup> (以降、MTM と呼ぶ) を周波数分析方法として採用し、その適用可能性について検討した。図-6 に、図-5 と同じ受振波形において MTM により算出した周波数分布を示す。この図によれば、FFT では縦波共振現象を捉えることが難しかった空隙までの深さが 180mm の場合においても、他の周波数成分に埋もれていた縦波共振に伴う周波数ピークが明確に判読できることがわかった。また、図-5 に示す空隙までの深さ 60mm の場合においても、MTM を用いることにより、縦波共振に伴う周波数ピークを、より判読しやすくなることが示された。

#### 4.4 空隙の検出可能範囲に関する検討

インパクトエコー法に関するオリジナルの文献<sup>1)</sup>では、空隙の検出可能範囲を、[空隙の大きさ]/[空隙までの深さ]=0.25 以上の場合としている。そこで、従来のインパクトエコー法により得られた周波数分布 (FFT) と、本研究で提案する波形処理および周波数分析手法 (MTM) を用いた場合とを比較し、両者間での

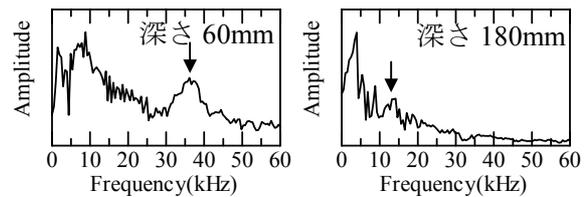


図-5 FFT による周波数分布

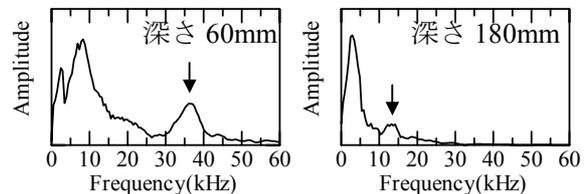


図-6 MTM による周波数分布

空隙の検出可能範囲の相違を調べた。これらの結果を、図-7 (a) と (b) にそれぞれ示す。この図の (a) および (b) の周波数分布は、いずれも、空隙の大きさが 45, 60mm, 空隙までの深さが 180, 250mm のケースである。図-7 (a) における、空隙までの深さが 180mm, 空隙の大きさが 45, 60mm の場合、縦波共振による明瞭な周波数ピークを周波数分布上に確認することは難しかった。これらのケースについて [空隙の大きさ]/[空隙までの深さ] を求めると、それぞれ 0.25, 0.33 となり、既往の研究<sup>1)</sup>を参考にすれば空隙の検出が十分可能な範囲ではあるが、必ずしも評価可能とは言い切れない。しかしながら、図-7 (b) に示すように、MTM を用いることにより、上述の空隙の大きさと深さにおいても、かなり明瞭に空隙からの周波数ピークが卓越することが明らかとなった。

一方、[空隙の大きさ]/[空隙までの深さ]=0.25 以下の領域においては、空隙の検出が困難<sup>1)</sup>とされている。このことは、図-7 (a) に示す、空隙までの深さが 250mm, 空隙の大きさが 45, 60mm ([空隙の大きさ]/[空隙までの深さ]=0.18, 0.24) のケースからも再確認できる。しかしながら、この領域において MTM を適用した周波数分布 (図-7 (b) 参照) を用いることにより、縦波共振の周波数ピークが明確になり、空隙の検出を可能にしていることがわかる。

本研究において実験を行ったパターン全てに

ついて、空隙の検出が可能か否かを判断するため、FFTによる評価結果と波形処理とMTMを併用した場合の評価結果とを比較し、空隙の検出可能範囲を図-8にプロットした。この図に示す「FFT 検出可能範囲」とは、従来の手法によるものを指し、波形処理などは行っていない。また、「MTM 検出可能範囲」とは、波形処理およびMTMにより空隙の検出が可能な範囲を示している。この図から、本実験結果の範囲では、[空隙の大きさ]/[空隙までの深さ]が0.25以上の領域においても、FFTでは空隙が検出できない場合があることがわかる。これに対して、0.25以下の場合においても、本手法で提案する波形処理および周波数分析にMTMを活用することにより、空隙の検出限界を拡大することができる可能を示された。

## 5. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 空隙の深さに応じた周波数を入力可能な鋼球直径のインパクトを選定することが、評価において有効であることを示した。
- 2) 表面波の存在を除去することにより、縦波共振現象を明瞭に捉えることができる可能性がある。
- 3) 周波数分析におけるマルチテーパ法では、高速フーリエ変換では検出が困難な条件にある空隙に対しても、空隙からの周波数ピークを卓越させることができる。
- 4) 本研究で提案する波形処理と周波数分析手法(MTM)の併用により、既往の研究で示された空隙の大きさと深さに関する検出限界を改善できる。

**謝辞** 本研究は、(財)港湾空港建設技術サービスセンターの研究開発助成を受けて行ったものである。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) Sansalone M.J., and Streett W.B.: Impact-Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., pp.29-200, 1997
- 2) Thomas M.Proctor, Jr: SOME DETAILS ON THE

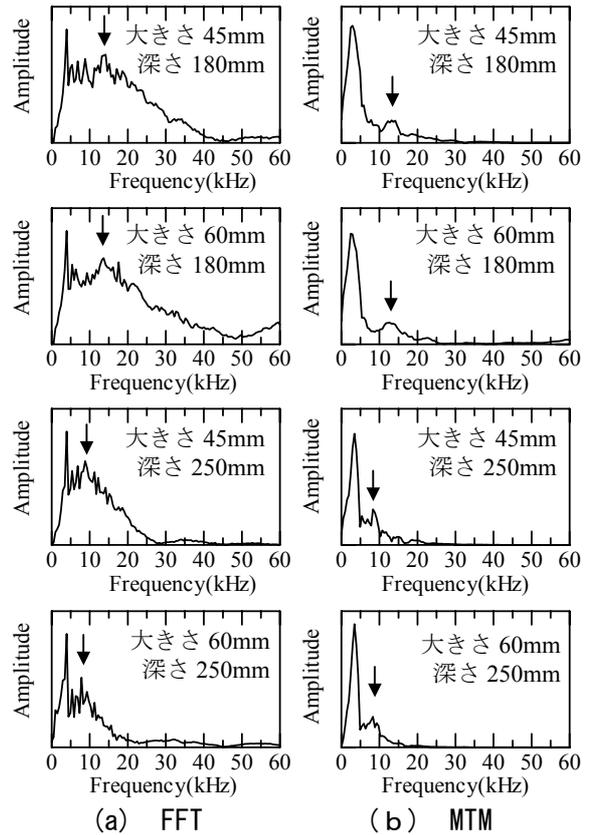


図-7 周波数分布の比較

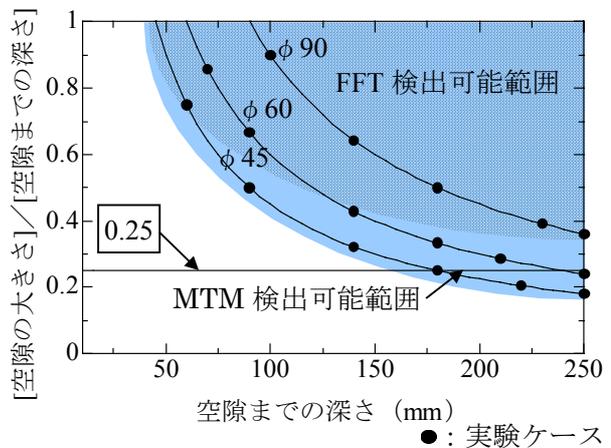


図-8 空隙の検出範囲

NBS CONICAL TRANSDUCER, Journal of Acoustic Emission, Vol.1, No.3, pp.173-178, 1982

- 3) 浅野雅則, 鎌田敏郎, 六郷恵哲ほか: 共振現象を利用したコンクリート内部の欠陥評価手法, 土木学会第59回年次学術講演会講演概要集V部門, pp.161-162, 2004
- 4) Percival.D.B., and A.T.Walden.: Spectral Analysis for Physical Applications: Multitaper and Conventional Univariate Techniques, Cambridge:Cambridge University Press, 1993