

論文 コンクリートの打音による健全性の評価について

金森 正樹^{*1}・飯坂 武男^{*2}・菊川 浩治^{*3}・梅原 秀哲^{*4}

要旨：コンクリートの非破壊試験には種々の方法があるが確立性は小さい。その中の一法である打音法は、簡便でどのような構造物にも適用できるが測定者の経験等による勘に頼っている。本研究はこの打音法を取り上げ、従来の方法からコンクリートの打撃音をマイクロフォンで録音後 FFT 解析により振幅波や周波数特性を分析し、測定結果を客観的に判定することの検討を行った。その結果、検査対象コンクリート面の打撃点、打撃周辺部、供試体背面状況等の変化並びに擬似欠陥部等の打撃音の相対的影響が打音法試験によって明確に現れることを確認した。

キーワード：非破壊試験、打音法、打撃音、周波数、相対音圧、周波数スペクトル

1. はじめに

近年、既存コンクリート構造物の早期劣化や耐久性の低下の事例が多く報告され始め、社会的に大きな反響を引き起こしている。すべての構造物が耐久性に欠けるというわけではないが従来コンクリート構造物はメンテナンスフリーと考えられ使用されていたがより長い間安全に使用するためには定期的に構造物を見回るだけでは不十分で、構造物の耐久性をさまざまな項目について診断し、管理、処置を施すことが要求され、コンクリート標準示方書にも耐久性照査型と掲載され品質管理などを明確に規定している¹⁾。

本研究ではコンクリートの非破壊試験法²⁾の中でも適用範囲の広い打音法について、測定者の経験等に頼っていた診断因子などの不透明な点を的確に把握することを目的として擬似供試体及び既存コンクリート構造物等の打撃音について検討を行った。

2. 打音法

2.1 打音の発生機構と表面振動

コンクリート表面にハンマーなどによる打撃

力を加えると、コンクリート表面に振動が発生し、その近傍に不完全な真空部分が生じる。次の瞬間に打撃方向と反対側に振れて空気の粒子を圧縮することになり、空気の密度の高い部分と低い部分が連続して進行方向に振動する疎密波である音波が発生する。空気中の音波は、その進行方向と空気の粒子の進行方向が一致しているので縦波⁴⁾⁵⁾⁶⁾である。このようにコンクリートの打撃音はコンクリート表面の振動と密接な関係がある⁷⁾。

打撃によるコンクリートの表面振動は、打撃箇所での急激な変位に対する体積弾性による振動とそれと同時に生じるひずみや応力によって現れる弾性波が境界面で多重反射して起こす振動と打撃力による打撃面の自由振動等が考えられる⁸⁾⁹⁾。また、音を客観的に表現するには音を構成する三要素である「音の大きさ(dB)」・「音の高さ(Hz)」・「音色(周波数スペクトル)」で表現される¹⁰⁾。しかし、測定者が耳によって聞き分けた音をこのような方法で表現することは困難である。

打音法は、コンクリートの品質、形状、構造上等の違いによって、他と異なる振動をするこ

*1 名城大学大学院生 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 名城大学助教授 理工学部建設システム工学科 工博 (正会員)

*3 名城大学教授 理工学部建設システム工学科 工博 (正会員)

*4 名古屋工業大学大学院教授 工学研究科都市循環システム工学専攻 Ph.D. (正会員)

とによる音の変化を聞き分ける方法である。

2.2 打撃音判定方法

一般に人間の聴覚は、4kHz 付近で最も感度が良くなり、低い周波数や高い周波数での感度が低下するという性質をもっている。平均の成人男性が聞くことのできる最も小さい音は、4kHz 付近の 0.00002Pa とされている。また、人間に聞こえる最も低い周波数の 20Hz 付近の音が聞こえるには、70dB の音圧レベルが必要である。したがって可聴とされている範囲での周波数または音圧に変化があったとしても、測定者に聞こえているとは限らない¹⁾。打撃音を FFT 解析、ウェーブレット解析による波形として表現すると、周波数・音圧レベル・周波数スペクトルとして打撃音の詳細な判別が可能である。

3. 実験概要

3.1 測定構造物及び供試体

測定対象既存構造物(名城大学内)は、**写真-1.2**に示した。寸法は以下の通りである。

既存構造物(1) 縦 110cm, 横 250cm, 厚さ 15cm

既存構造物(2) 縦 750cm, 横 415cm, 厚さ 24cm

今後既存構造物(1), (2)を打撃面 1,2 と呼ぶ。

打撃面 90×90cm の厚さ 15cm および 7.5cm を既存構造物 1 の擬似供試体として作製して測定を行った。また、欠陥供試体として厚さ 15cm 供試体の中央の 30cm 四方に深さ 8cm の陥没のある供試体を作製して測定を行った。コンクリート供試体について**表-1**に示す。

3.2 測定点及び供試体支持条件

既存コンクリート構造物の測定点は、中心から 15cm 間隔で上下に 1 点ずつと左右に 2 点ずつの 7 点の測定(**写真-1**)を行った。供試体の測定点は**図-1**に示す。また、供試体に関しては、支持条件による打撃音の変化を知るために四隅を単純支持したものと打撃面以外を砂で全て覆ったものと、背面を空洞にし、その周囲を砂で覆った 3 つの条件で測定を行った。

3.3 打撃方法

打撃には $\phi=48\text{mm}$ 重さ 438g の鉄球を用いた。

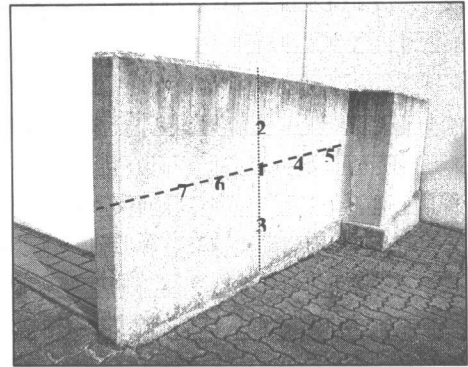


写真-1 既存構造物(1)

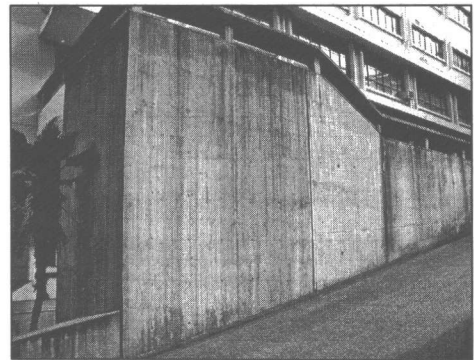


写真-2 既存構造物(2)

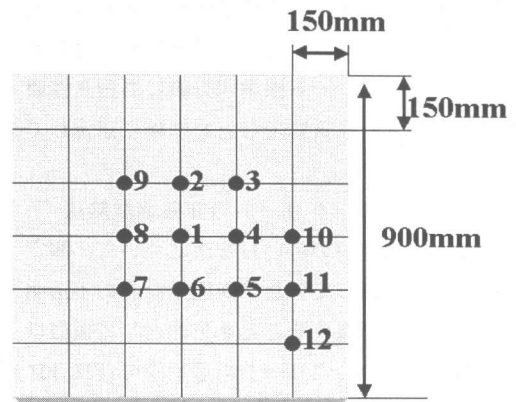


図-1 供試体測定点No.

表-1 供試体コンクリート

単位量(kg/m ³)			
水	セメント	細骨材	粗骨材
W	C	S	G
210	383	773	972

W/C=55% s/a=44%

密度 2.31 圧縮強度 32MPa

既存構造物は振り子式(振り子長さ 30cm, 振り上げ角度 60°)で, 供試体は自由落下(落下高さ 15cm)で行った。また, 打撃力を 1/2(振り上げ角度 30° , 落下高さ 7.5cm), 鋼球($\phi=48\text{mm}$ 重さ 268g), ハンマー(1100g)でも行った。

3.4 録音方法

打撃音の集音は, 2つの全指向性マイクロフォンで行い, 打撃点から左右に打撃面から 7cm 離れた位置に設置した。マイクロフォンはカセットレコーダーに接続し, 録音を行った。測定は 1点につき 8回打撃を行った。

3.5 打音解析法

カセットレコーダーに録音された音は, それぞれ FFT, ウェーブレット解析を行い振幅波, 周波数スペクトル, ウェーブレット表示し, 検討を行った。FFT は, 横軸に $170\sim 11000\text{Hz}$ の周波数, 縦軸に相対的音圧 $-80\sim 0\text{dB}$ をとっている。縦軸値 dB は dB 変換定数を 2000 としている。ウェーブレットも, オリジナルウェーブも縦軸固定で $-16000\sim 16000$ の範囲である。レベル表示は 6本としている。

4. 実験結果及び考察

実験結果を振幅波・周波数スペクトル・ウェーブレットそれぞれに分けて以下に一例を記す。

測定した代表的な打撃音の周波数スペクトルを図-2, 3, 振幅波を図-4, ウェーブレット表示を図-5 にそれぞれ示す。

4.1 周波数スペクトル

周波数スペクトルは, 打音を FFT (高速フーリエ変換) 解析して横軸を周波数, 縦軸を音の強さ(相対音圧)で表したものである。

図-2 は, 既存構造物の測定点, 打撃面(測定対象構造物), 打撃力(1/2の振り上げ角度 30°), 打撃物(鉄球から鋼球)を変えた場合の周波数スペクトルである。打撃面 1 の打撃音には, 相対音圧の大きさは異なるが $470,1350\text{Hz}$ の周波数が共通して卓越している。

図-3 は, 同じ配合(表-1)で作られた 3種類の供試体(版厚 15cm, 版厚 7.5cm, 版厚 15cm の中央

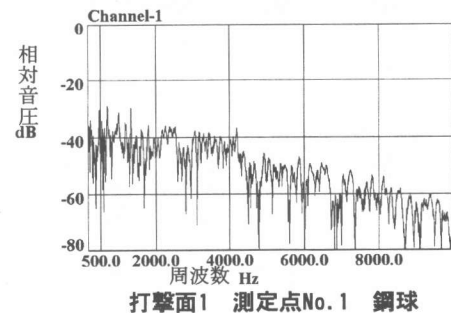
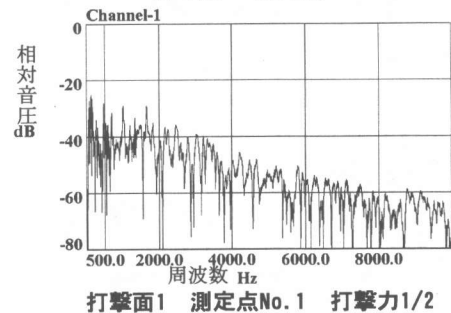
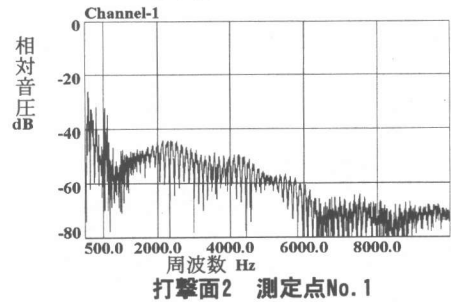
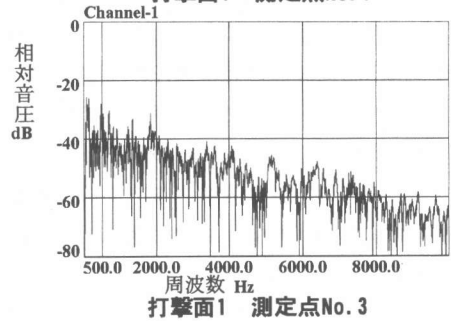
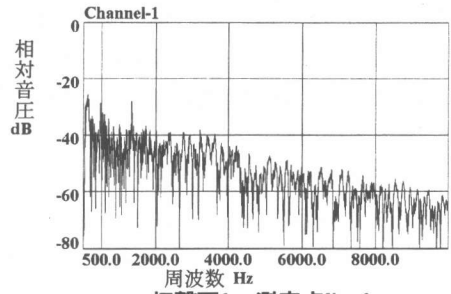


図-2 既存構造物の周波数スペクトル

部が陥没)の測定点 No.1 での打撃音測定による周波数スペクトルである。3 つの供試体はそれぞれいくつか卓越した周波数がある。この内の1750Hzあたりの周波数が共通して卓越している。この値は版厚15cmと7.5cmの場合はそれぞれの打撃音の卓越している周波数の中で最も大きい欠陥供試体の場合は他の周波数の方が大きく卓越している。また、版厚15cmと7.5cm供試体、打撃面1と2の波形から打撃方向の厚さが薄くなると周波数の相対音圧が大きくなり、同じ配合、支持条件、寸法である供試体では共通卓越周波数大きくなって他の卓越周波数が小さくなっている。欠陥供試体は打撃方向の厚さが7cm程度であるが1750Hzの周波数の大きさは変わっていない。

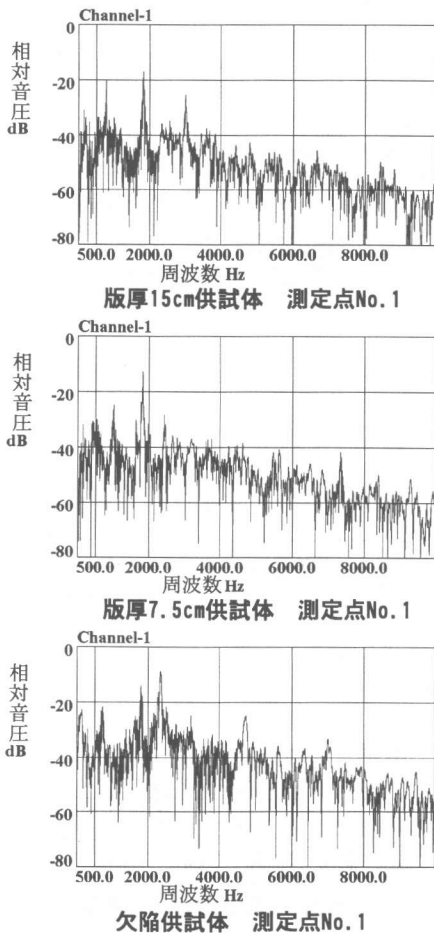
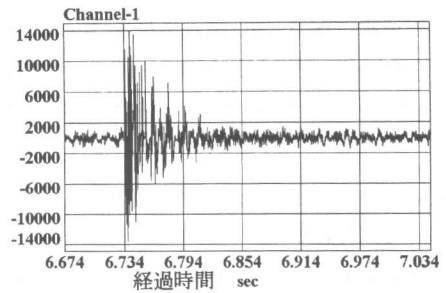
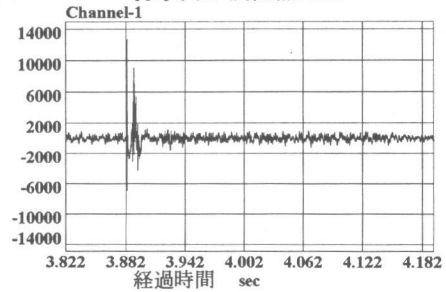


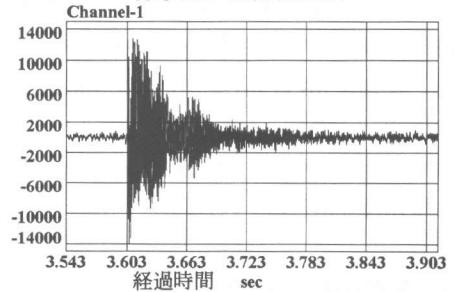
図-3 打撃面の異なる周波数スペクトル



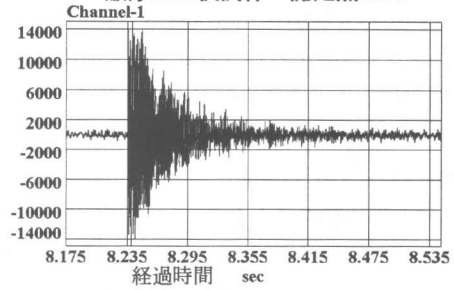
打撃面1 測定点No.1



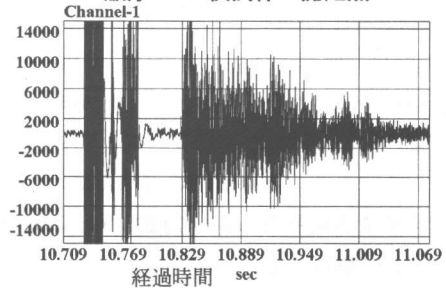
打撃面2 測定点No.1



版厚15cm供試体 測定点No.1



版厚7.5cm供試体 測定点No.1



欠陥供試体 測定点No.1

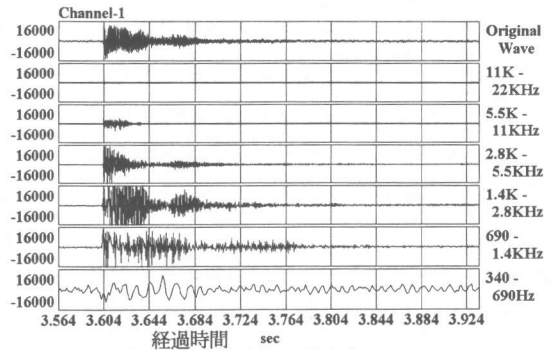
図-4 打撃面の異なる振幅波形

4.2 振幅波

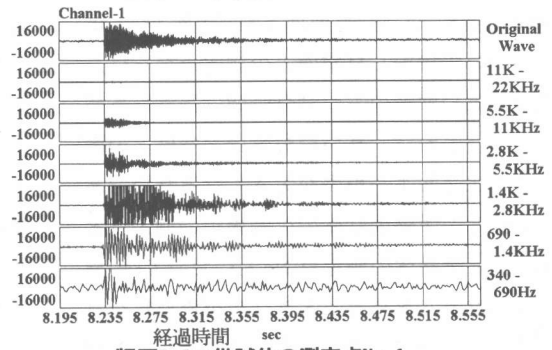
振幅波は、横軸に録音開始からの経過時間(1 コマ 0.06sec), 縦軸に音の強さを表したものである。

図-4 に打撃面の異なる振幅波形をそれぞれ示す。打撃面 1 と 2 および供試体版厚 15cm と 7.5cm を比較すると基本的には打撃面が異なると立ち上がりの大きさも減衰時間も異なる波形になっている。立ち上がりの大きさの違いは、打撃面 2 や版厚 15cm 供試体の方が打撃方向に対する奥行き深さのため振れ幅が小さくなり、振幅も小さくなっている。また、打撃面 2 の減衰時間は、最大振幅が小さいのと打撃方向の厚さがコンクリート表面の振動するエネルギーを吸収してしまうために減衰時間が短くなる。

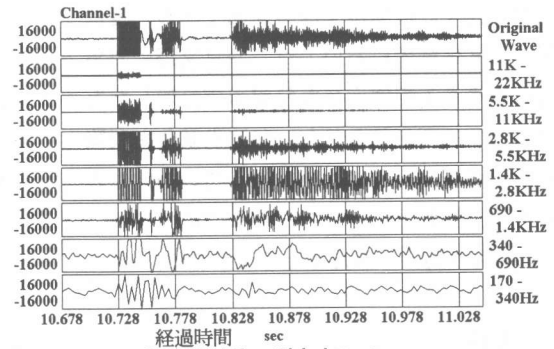
欠陥供試体は、振幅波の最も特徴的な傾向が表れる。振幅の立ち上がりから減衰の間に 0.05sec 間の振幅のない部分が存在する。これは、裏に陥没のある測定点にだけ存在し、測定点を裏に陥没のないところ(陥没の端から 7cm 程度離れた点)で測定を行うとこの傾向は見られなく、15cm 供試体と同じような振幅波になる。また、供試体支持条件が異なると打撃力による打撃面の自由振動が変わるため立ち上がり振幅の大きさが異なり、減衰時間は、コンクリート表面が空気を動かすことや内部摩擦などにより最初に与えられたエネルギーを使い果たしてしまうので、立ち上がり振幅が大きくなる程に減衰時間は長くなる。音の大きさは、振動する面積が大きい方が大きな音がするが、打撃面積の最も大きい打撃面 2 のように打撃方向のコンクリートの厚さが大きいとコンクリート表面の振動する面積の範囲は小さく大きな音を発しない。打撃方向の厚さの異なるコンクリートの場合、同じ打撃面積、品質、支持条件ならば厚さの小さいコンクリートの方が振動する面積が大きいので音圧は大きくなっている。



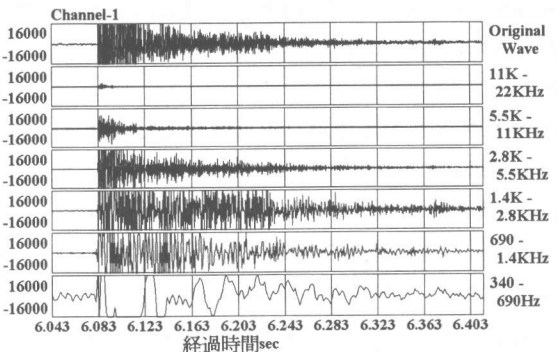
版厚15cm供試体の測定点No. 1



版厚7.5cm供試体の測定点No. 1



欠陥供試体の測定点No. 1



欠陥供試体の測定点No. 8

図-5 ウェーブレット解析

4.3 ウェーブレット解析

ウェーブレットの解析に用いた周波数範囲は、音圧が大きくても170Hz以下の周波数の打撃音は聞こえないので、170Hz以上11000Hz以下の範囲のみを取り扱った。横軸は録音開始からの経過時間、縦軸は振幅のスケールの大きさを示している。

図-5は、同一測定点での版厚の異なる供試体と欠陥供試体の欠陥部上測定点 No.1 と欠陥部から離れた測定点 No.8 のウェーブレットによる解析結果を示した。打撃面1,2と版厚15cm供試体においては同じ打撃面上の測定点ならば、周波数が低い波形の方が減衰時間は長くなる傾向にある。これは、高い周波数ほど空気との摩擦によるエネルギー損失が大きくなるためである。しかし、欠陥供試体の欠陥周辺の測定点と版厚7.5cm供試体の測定点 No.1 においては、周波数スペクトルを見ると大きな卓越周波数が見られる1.4kHz~2.8kHzの範囲の波形が最も減衰時間が長く、以降短くなる傾向である。特に版厚7.5cm供試体においては、四点支持の対角線上の点がある程度大きな打撃力で打撃したときに起こる傾向が見られた。欠陥供試体も欠陥部分から離れた場所においては、この傾向は表示されず、打撃力に対して打撃方向のコンクリートの厚さが薄かったためと考えられる。

5. 結論

本研究の打撃法によるFFT解析などによる実験を行った結果、次のような結論を得ることができた。

- (1) 周波数スペクトルでは打撃力をかえても変わらず卓越する周波数がある。
- (2) 同一供試体における異なる支持条件下のコンクリートの打撃音には振幅波、音圧が異なっても共通して卓越する周波数がある。また、打撃方向厚さが異なる同じ配合、打撃面積の場合には厚さは小さくなるとスペクトルの周波数に対する音圧の大きさが大きくなる。
- (3) 背面に陥没部のある部分の打撃音の周波数

スペクトルでは健全部とは異なる周波数が最も大きな値を示す。

- (4) 欠陥部分の振幅波には減衰過程に振幅のない波形になる大きな特徴がある。また、欠陥部分をはずれた部分では振幅波は、健全部と同じ波形になる。
- (5) 打音によるコンクリートの診断には振幅波が有効であるが周波数スペクトルも同時に判定に利用するとより判定因子が増え、確実な判別が可能である。
- (6) ウェーブレットによる解析にはある特定の周波数領域での増幅や減衰時間の長短があり、振幅波形だけでは分からない変化をとらえることができる。

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書-耐久性照査型-施工編土木学会、平成11年版、2000.1
- 2) 笠井芳夫、石井勇五郎：コンクリート構造物の非破壊試験法、養賢堂、1994
- 3) 笠井芳夫他：コンクリート構造物の非破壊検査、オーム社、1997
- 4) 鈴木公平、西田公至、丸山晃市、渡辺武：機械工学のための振動・音響学、サイエンス社1989
- 5) 太田光雄他：基礎物理音響工学、朝倉書店、1990
- 6) 伊藤毅：音響工学原論(上巻)、コロナ社、1971
- 7) 魚本健人、伊東良浩：打撃法によるコンクリートの非破壊試験、コンクリート工学論文集、第7巻第1号、pp.143-151、1996。
- 8) 西村源六郎：振動工学、誠文堂新光社、1969
- 9) 竹田仁一、立川博之、藤本一男：コンクリートと衝撃、コンクリート工学、Vol.15、No.4、pp.1~11、1977
- 10) 唐澤誠：音の科学ふしぎ事典、日本実業出版、pp.13-32、1997
- 11) 中村健太郎：音のしくみ、ナツメ社、1999