

# 超音波を含んだシンバル音の指向特性

西村 明<sup>1</sup>、 小泉 宣夫<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京情報大学 総合情報学部 情報文化学科

〒 265-8501 千葉県若葉区谷当町 1200-2

TEL 043-236-4658, akira@rsch.tuis.ac.jp

<sup>2</sup> 東京情報大学 総合情報学部 情報システム学科

nkoizumi@rsch.tuis.ac.jp

**あ ら ま し** シンバル音について超音波帯域まで含んだ録音を行い、その時間-周波数特性を主に分析した。録音時の演奏条件として、打撃位置、スティックのチップ材質を、収録条件としては、マイクロホン方向、マイクロホン距離を変えた。その結果、超音波成分は可聴帯域成分に比べて急速に減衰し、打撃から約 1sec の間にほとんど無くなってしまふことが分かった。また、シンバルの側方にマイクロホンを置いたときに、より強く超音波を収録できることから、超音波はエッジ部から相対的に強く放射されていることが推測できた。可聴帯域成分のスペクトルや減衰特性は、過去の報告とほぼ同様な結果になった。

**キーワード** 時間-周波数分析、音放射、録音、高精度オーディオ

## Directional patterns of the cymbal sounds which contain supersonic waves

Akira Nishimura<sup>1</sup>, Nobuo Koizumi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Media and Cultural Studies, Faculty of Informatics,

Tokyo University of Information Sciences

1200-1, Yatoh-cho, Wakaba-ku, Chiba-city, Chiba 265-8501, Japan

TEL +81-43-236-4658, akira@rsch.tuis.ac.jp

<sup>2</sup> Department of Information Systems, Faculty of Informatics,

Tokyo University of Information Sciences

nkoizumi@rsch.tuis.ac.jp

**Abstract** We recorded sounds of a cymbal including supersonic sounds, and time-frequency analyses of the sounds were mainly conducted. Several conditions were varied for recording: positions to strike and materials of tip of the stick as striking conditions, and direction and distance of the microphone as recording conditions. As a result of the analyses, supersonic components decay rapidly compared with the audible components and disappear in about one second after striking. Since relatively strong supersonic components were observed from the side of the cymbal, supersonic waves are supposed to be radiated from the edge portion of the cymbal. Sound spectra and characteristics of their decay resemble the observations by the previous researchers.

**Key words** time-frequency analysis, sound radiation, recording, high definition audio

# 1 はじめに

DVD-Audio, SACD などの新世代オーディオ規格では、可聴帯域より高い周波数の超音波帯域 (20kHz 以上) を記録し再生できることが特徴のひとつである。しかし、超音波がもたらす知覚や認知そして感性への影響について、統一した見解はいまだ得られていないと言えよう。代表的なものとしては、下記のような説がある。

- 超音波によって生じるスピーカの非線形歪み<sup>1)</sup>が可聴域の音となって知覚に寄与する
- 超音波のみとしては聴こえていないが、可聴帯域の音と一緒にすることによって特殊な効果が生じる

このようなアプローチについては、それぞれ厳密な科学的手法を用いてさらなる探究や追試が望まれている。一方で、これらの研究では、合成音や収録された音楽などを音刺激として用いて議論が行われているため、超音波を含む“生の音”の知覚に関する知見はいまだ非常に少ない。

よって、超音波知覚に関する新たな検証として、超音波を含む“生の音”と、マイク、録音再生媒体、増幅器、スピーカという電気音響系を通した“収録された音”との知覚の違いを調べることも有意義であろう。<sup>2)</sup>

超音波を含んでいる楽器音については、実測結果<sup>3)</sup>がいくつか示されているが、“生の演奏音”と“収録された演奏音”とを比較試聴し、その違いを明らかにする、という目的のためには、いくつかの条件が考えられる。まず、繰り返し試聴を行うためには、演奏音に再現性が容易に確保できる必要がある。また、聴取者の判断を助けるためには、ある程度その楽器音に親しんでいることが必要であろう。このような条件を満たす楽器音として、シンバル音が妥当であると我々は考えた。シンバルは、クラシックからロックまで、大衆音楽において非常に使用頻度が高い楽器であり、その形状や演奏法によって音質は変わるとはいえ、一般的な聴取者は、その生の演奏音と収録された演奏音の両方に親しんでいると言える。

また、比較試聴を行う場合、“生の音”を可能な限り忠実に記録し再生する必要がある。無響室において録音と試聴を行う場合は、直接音のみの比較試聴であり、比較的問題は単純ではあるが、どの位置にマイクロホンを置いて収録した音が超音波を含むその楽器の音として妥当であるのか、については考慮すべきである。残響のある通常の部屋で比較試聴を行う場合には、楽器の放射特性は、受聴者位置での音色に幾分影響を及ぼすであろう。そして、シンバル打撃方法や打撃位置によって、超音波の発生が異なるか否かもいまだ明らかではない。

これらをふまえて、本稿では、シンバル音を超音波帯域まで録音し、その時間一周波数特性や指向特性を分析した結果を報告する。

## 2 シンバル音の収録

### 2.1 対象シンバル

収録に用いたシンバルは、Zildjian 製、A.Custom Crash Thin 16inch モデルであり、その直径は実測で 411mm、エッジでの厚みは、約 0.5mm である。材質は公表されていない。Fig.1 に、そのおおよかな断面図と各部の名称を示した。

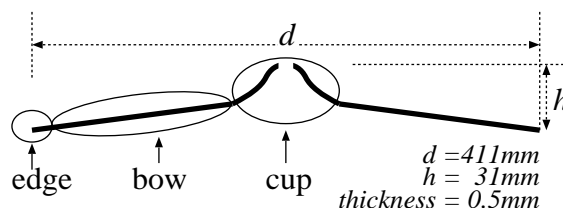


Fig. 1 A cross section of the cymbal.

### 2.2 収録方法

Fig.2 に示すようなシンバル断面図上の位置にマイクロホンを設置した。中心真上のマイクロホンは、常に固定しており、もう一方のマイクロホンを各位置に移動させて、2チャンネル同時録音を行った。収録に使用した器材は、Table1 に示した。

超音波領域のマイクロホン感度に関しては、音響的な校正法がいまだ確立されていない<sup>3)</sup>ため、可聴域との相対的な感度については、正確かどうかの疑問は残されている。しかし、同一特性の指向角度を変えたマイクロホン2個を使って同時に録音を行い得られる、一方に対するもう一方の相対的なパワー比については、超音波領域についても信頼することができる。

### 2.3 打撃方法

ロック音楽では、クラッシュシンバルとライドシンバルは、主に演奏法によって区別されるが、クラッシュシンバルには、厚みが薄めのものを用いるのが一般的である。クラッシュシンバルは、スティックのショルダー部(先端部を除くテーパのかかった部分)によってエッジ部分を打撃し、演奏にアクセントを付けるために使用される。ライドシンバルは、ハイハットと共に、主にリズムをきざむために用いられ、スティックのチップ(先端)部によってカップやボウ部を打撃する<sup>4)</sup>。

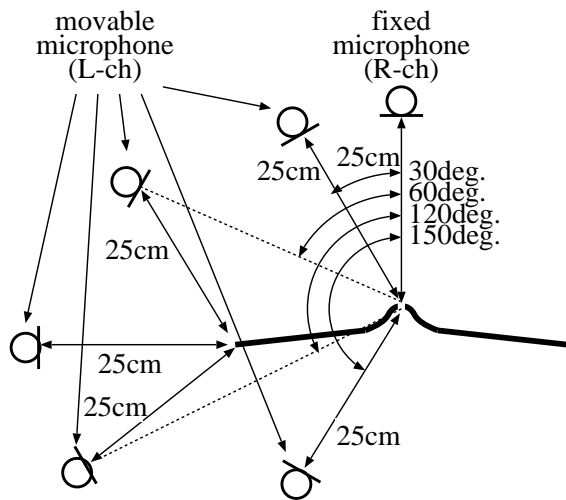


Fig. 2 Location of the microphones.

人力によるスティックのショルダー部による打撃は、スティックの接触位置を一定に制御するのが比較的困難であり、打撃時の条件をなるべく一定にするため、スティックを振り下ろして、スティックが水平になる時点でチップが打撃点に接触するように打撃を行った。1回の打撃に対して、十分シンバル音が減衰したことを確認後、繰り返し打撃を行い、基本的に1条件につき、3回の人力による打撃を行い収録した。

Table 1 Apparatuses for recording.

apparatus	model	notes
Microphone	B&K 4191 x 2	1/2inch, 2Hz~40kHz
Pre amp.	B&K 2669 x 2	
Charge amp.	B&K 5935	
A/D converter	SEK'D Prodif96	16bit, fs=96kHz

また、その他の打撃条件やマイク位置条件によって、収録音の音質が変化する可能性があるため、それらを変えた収録も行った。その条件については、分析時に改めて示すことにする。

### 3 分析

ここでの分析は、明示しない限り、ヒッコリーチップによる、シンバルエッジ部の打撃を、マイクロホン距離25cm、打撃位置とマイクロホン面 (Fig.2 に示したマイクロホンを配置する断面) との角度 90deg. の条件にて得られた収録音について行っている。

### 3.1 波形と周波数分析

Fig.3 に、0deg.(真上) にマイクを置いたときに得られた波形と、同時に 90deg. の方向で得られた波形を示した。この図からは、真上にマイクを置いた場合には、シンバルの振動変位方向にマイクがあるため、主要な振動モード周波数を波形から比較的明瞭に観察できることが分かる。

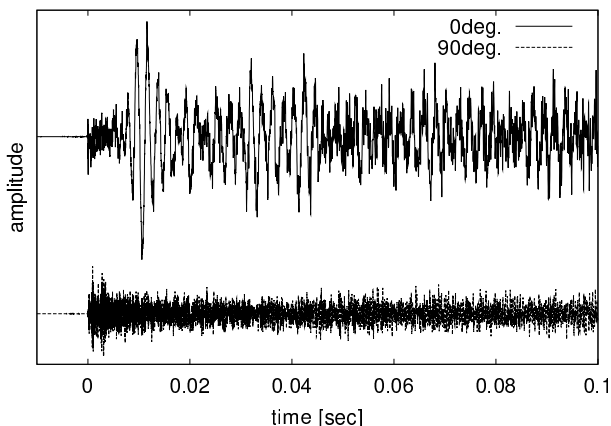


Fig. 3 Waveforms recorded from 0deg. and 90deg. oriented microphones.

Fig.4 には、0deg. のマイクより得られた、打撃時刻を 0 として 5.46sec(524288points) までの波形のパワースペクトル密度を計算して示した。

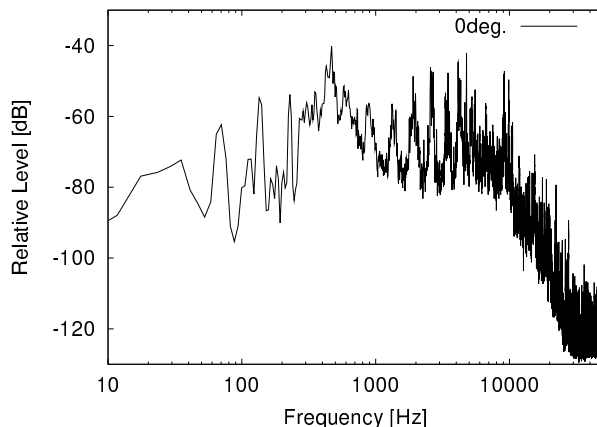


Fig. 4 Power spectrum density during 0 and 5.46sec. FFT size is 16384 points, and Hanning windowing is used.

### 3.2 時間-周波数特性

Fig.4 では、打撃から減衰するまでの比較的長い時間の平均スペクトルを示したが、ここでは、スペクトルの時間変化を調べることにした。モード周波数成分やその

減衰を詳細に調べる意図はなく、打撃による発音の再現性や、超音波帯域と可聴帯域との関係をおおまかに調べるため、1/3 オクターブ分析を行うことにした。

250Hz~40.3kHz を中心周波数とする 23 の 1/3 オクターブバンドごとに、4097 タップの FIR フィルタによるバンドパスフィルタを通した後、4096 点の Hamming 窓を 2048 点づつずらしながら、実効値を算出することによって、パワーの時間変化を調べた。最も低い 250Hz の帯域については、ローパスフィルタを用いて、ゼロ周波数までのパワーを求めた。シンバル音の開始時刻は、波形において最大となる振幅絶対値に対して、-40dB となる振幅絶対値が記録される時刻とした。

0deg. 方向の固定マイクロホンから得られる打撃音は、移動マイクロホンを 0deg. に並べて置いた条件を含めて、各マイクロホン角度につき 3 回打撃しているの、合計 18 回となる。Fig.5 には、0deg. 方向のマイクロホンから得られた波形について、開始時刻を第 0 フレーム (0msec) として、第 1, 5, 50 フレームの平均スペクトルを示した。誤差棒は、 $\pm 1$  標準偏差である。それぞれ、開始時刻より 21.3, 106.7, 1066.7msec を中心とするパワーレベルとなる。

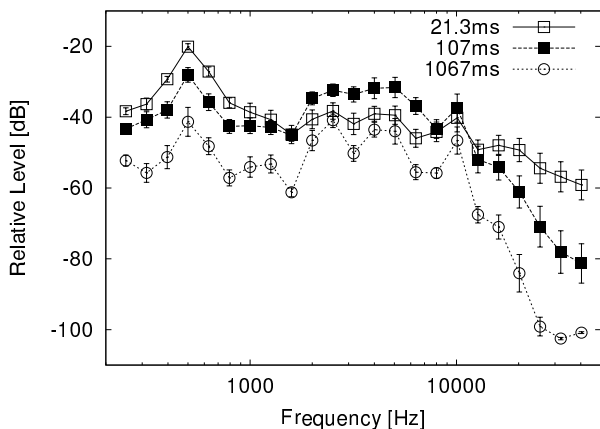


Fig. 5 Average power spectra of each time segment. Error bars show  $\pm 1$  standard deviation.

超音波成分については、打撃直後に最も強いパワーが観測され、その後、可聴帯域の減衰と比較して速く減衰していくことが分かった。また、約 1500Hz 以下の帯域は、打撃直後から減衰していくが、約 2k~10kHz の帯域は打撃から約 100~200msec の時に最もパワーが強くなること分かった。このことを含めて、可聴帯域におけるシンバル音のスペクトルやその減衰の様子は、過去に報告されている結果<sup>5)</sup> とほぼ同じであった。

各点での標準偏差は、10kHz 以下では、1~3dB、それ以上の周波数帯域では、2~5dB であった。高域では

スペクトルとその時間変化に打撃毎のばらつきがややみられるが、人力による演奏音に、ある程度の再現性を持たせられることが分かった。よって、以降の分析では 3 回の収録音のスペクトルの平均を用いて分析を行った。

### 3.3 指向特性

Fig.6 に、0deg. のマイクロホンより得られるスペクトルを基準として、同時に録音される 30, 60, 90, 120, 150deg. のマイクロホンより得られるスペクトルとの比を、21.3, 106.7, 1067msec の時刻にて比較した。打撃直後 (0~約 100msec) の、シンバル側方 (60~120deg.) に、相対的に超音波が強く放射されることが分かった。

### 3.4 収録音質に影響を与える要因

#### 3.4.1 打撃位置

ここまでの分析は、全てシンバルのエッジ部をスティックのチップ部により打撃した音についてであったが、打撃する位置をカップ部あるいはボウ中央部として得られたスペクトルを示す。

Fig.7 に、0deg. 方向のマイクロホンにて得られた、カップ、ボウ中央、エッジ部を打撃したときのスペクトルの時間変化を示した。ボウとエッジ打撃のスペクトルの時間変化は似ているが、カップ打撃では、他の打撃位置にくらべて、打撃直後に超音波が強く放射されることが分かった。また、音を聴いただけでも明らかなのではあるが、カップ打撃の場合は、全ての帯域に渡って減衰が速くなることも分かった。

#### 3.4.2 ウイングナットの締め具合

シンバルは通常、スタンド上部のティルター部分にナイロンチューブをかぶせ、下から、スチール・ワッシャー、フェルト・ワッシャー、シンバル、フェルト・ワッシャー、ウイングナットの順番で取り付けられる<sup>4)</sup>。今回の録音では、演奏者が自己の経験 (ロックドラム歴約 7 年間) により、ウイングナットの締め具合を調節した。この締め具合や、フェルトの有無によって、音色は変化するが、これを変えた録音は行っていない。

#### 3.4.3 マイクロホン距離と位置

Fig.8 に、0deg. 方向のマイクロホン距離を 25cm あるいは 50cm として得られたスペクトルを比較して示した。距離 50cm のほうが、打撃時から約 200msec ほどの間に超音波が相対的に強く (最大約 +14dB 程度) 現われる。

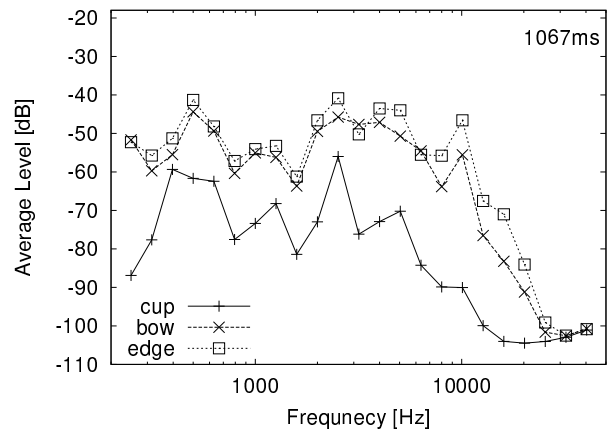
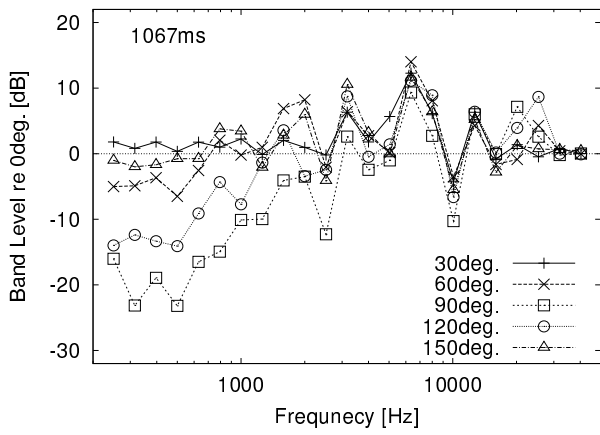
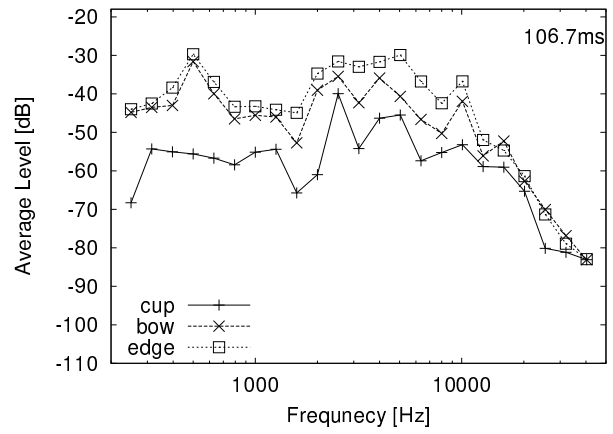
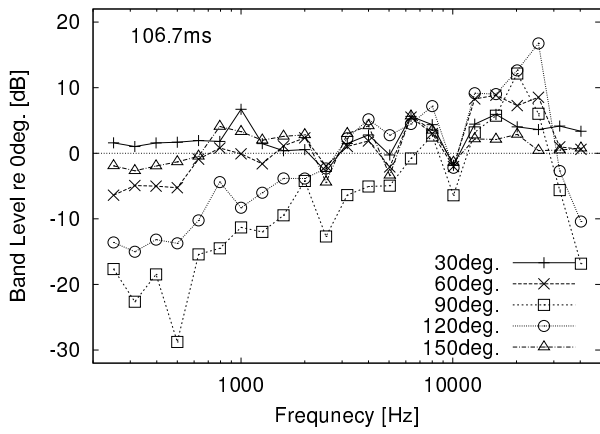
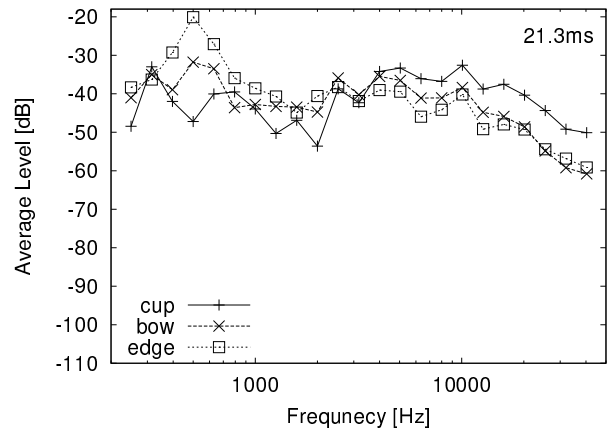
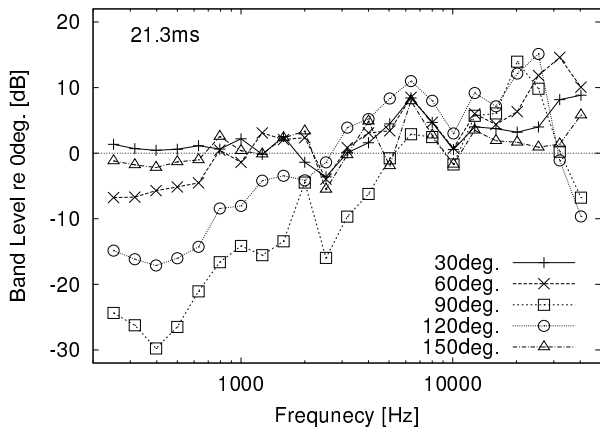


Fig. 6 Average band levels obtained from each direction relative to 0 deg.,

Fig. 7 Average band levels of each strike position.

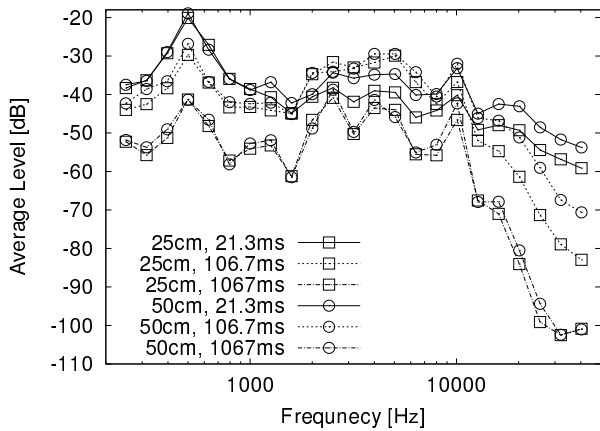


Fig. 8 Average band levels as a function of microphone distances and time segments.

### 3.4.4 チップの材質

スティックのチップ部分の材質を、ヒッコリー、ナイロン(プラスチック)、オークの3種とし、シンバルのボウ中央部をチップ部により打撃した音を、0deg. 方向のマイクロホンより収録した。それぞれ6回打撃を行い、そのスペクトルを第3.2節と同じ手法によって求め、6回の平均を算出した。

Fig.9は、21.3msecでのスペクトルを3つのチップ素材間で比較したものである。この図も含めて、他の時刻においても、ほとんどスペクトル形状やその減衰に、チップ素材による大きな違いは認められなかった。

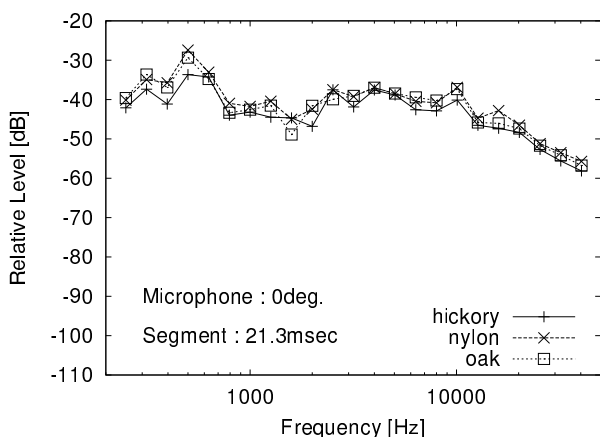


Fig. 9 Average band levels of 6 strikes obtained from each material of the tip of the stick.

## 4 考察

### 4.1 シンバルの超音波放射特性

Fig.8からは、0deg. 方向のマイクロホン距離が遠くなることによって、超音波成分が強く収録されることが示された。これは、距離が遠くなると、マイクロホンから見た、シンバルのボウやエッジ部への見込み角度が浅くなり、マイクロホンの指向特性における超音波領域のゲインが向上するため、よりボウやエッジ部からの超音波放射を強く捉えることができたと思われる。

そして、0deg. 方向に対する各方向での相対的なレベルを求めた Fig.6 の、90deg. および 120deg. における 21.3 および 106.7ms のスペクトルから推測されることは、シンバルのエッジ部から 20~25kHz の成分が強く放射されているということである。

シンバルにおける超音波の放射は、高次モードの振動によって生じると考えられる。なかでも、円周方向のモード周波数と直径方向のモード周波数とが近接する場合に生じる両モードの混合は、ボウ部において複雑な振動モード状態をつくり出す<sup>5)</sup>。そして、ボウ部では、振動によって放射される音の半波長に対してシンバルの曲げ振動の節間距離が短いときに、隣接する節間において放射音の相殺が起きる。よって、エッジ部からは相対的に高い周波数成分が放射されやすいと推測される。

一方で、30deg. および 60deg. 方向のマイクロホンは、打撃直後(21.3ms)に、25~40kHz の成分を強く捉えており、この成分は、90deg. および 120deg. と比較すると 15~19dB ほど強い。この帯域については、0deg. 方向のマイクロホンを遠ざけることによって相対レベルは上昇しており (Fig.8)、先のマイクロホンの指向性の考察からは、これはどのような放射の結果なのかよくわからない。

### 4.2 高品位記録再生とシンバル音

Fig.7 や Fig.8 の分析から、シンバル音の超音波成分は、打撃から約 1 秒までの間にほぼ無くなってしまうことが分かった。つまり、超音波が直接シンバル音に影響しているのは、打撃から僅かな時間だけであると考えられる。

超音波も含む高品位記録再生系の評価の一側面として、原音(生音)の忠実記録再生を挙げるならば、シンバル打撃音を題材とした、忠実記録再生の主観的な評価を、その指標のひとつとして挙げるができるであろう。

もっとも、シンバル打撃音の音質を左右するのは、超音波の存在だけではなく、可聴帯域も重要であることは言うまでもない。このことを加味したとしても、他の電

気音響系より相対的に歪みの大きいラウドスピーカを常に用いて、かつ、既存の音楽ソフトを用いた時点で、何が“本来の音”かという基準のなくなっている状態で電気音響系の主観的な音質評価を行うような従来手法に加えて、“生の音”というはっきりとした基準の下で、電気音響系による音質変化を主観的に捉えるというアプローチも、高品位記録再生の評価として、今後検討していくべきだと我々は考える。

## 5 まとめ

シンバル音について超音波帯域まで含んだ録音を行い、その時間-周波数特性を主に分析した。録音時の演奏条件として、打撃位置、スティックのチップ材質を、収録条件としては、マイクロホン方向、マイクロホン距離を変えた。

その結果、超音波成分は可聴帯域成分に比べて急速に減衰し、打撃から約 1sec の間にほとんど無くなってしまふことが分かった。また、シンバルの側方にマイクロホンを置いたときに、より強く超音波を収録できることから、超音波はエッジ部から相対的に強く放射されていることが推測できた。可聴帯域成分のスペクトルや減衰特性は、過去の報告とほぼ同様な結果になった。

## 謝辞

本研究の一部には、東京情報大学学術フロンティアプロジェクト研究費および、平成 13 年度東京情報大学共同研究 4 の補助を受けた。

## 参考文献

- 1) 蘆原郁, 桐生昭吾, “周波数帯域の拡張に伴うスピーカの非線形歪の増加,” 日本音響学会誌, **56**, 549–555 (2000).
- 2) 大賀寿郎, “次世代オーディオシステムに関する一考察,” 電子情報通信学会技術研究報告, **HDA00-10**, 8–13 (2000).
- 3) 藤森威, “次世代オーディオとマイクロホン校正技術,” 電子情報通信学会技術研究報告, **HDA00-7**, 13–18 (2000).
- 4) 佐野正佳, *Drummer's Tool Book* (リットーミュージック, 東京, 1997).
- 5) N. H. Fletcher and T. D. Rossing, *The Physics*