

# 打楽器シンバルにおける超高周波音：脳波データ処理と統計手法による音圧評価

北島, 匠 / KITAJIMA, Takumi

---

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

55

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

8

(発行年 / Year)

2014-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00010305>

# 打楽器シンバルにおける超高周波音 - 脳波データ処理と統計手法による音圧評価 -

HIGH FREQUENCY SOUND OF CYMBALS

ELECTROENCEPHALOGRAM (EEG) DATA PROCESSING AND STATISTICAL TEST OF SOUND PRESSURE

北島匠

Takumi KITAJIMA

指導教員 御法川学

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

In general, human audibility can be 20 kHz. However, it is indicated that the sound over human audibility is affected to the sound quality. Therefore, in this study, the sound recording and analysis over 20 kHz are tested by using cymbals and sound evaluation system using EEG is developed. As a result, the stiffness of cymbal shape is mainly affected to the cymbal sound below 20 kHz and hammering process and Vickers hardness are mainly affected to the cymbal sound over 20 kHz. Moreover, the sound evaluation is conducted by recording and analyzing alpha and beta wave with statistics.

**Key Words:** Cymbal, Sound, Octave Band Analysis, Analysis Of Variance, Sound Evaluation, EEG

## 1. 諸言

近年、様々な工業製品において低騒音化、低振動化は重要な項目とされている。他方、楽器のように発生音が本来の性能である場合には音質が重要になる。音質は聞き手の感性によって決まる量であるため、音質評価として官能試験が行われている。

当研究室で行われてきたシンバルの音質向上の研究では、周波数解析や実験モード解析を行い、更に独自のデータ処理を施し、官能評価を行う事で音質向上を試みてきたが、大きく3つの課題が残されていた。

- ① 最近の研究では、人間の可聴周波数限界である20[kHz]を大きく上回る超高周波音が楽器の音質に大きな影響を与える研究例が報告されている。
- ② 音質の向上を達成したとしても製造の分野にまでフィードバックできていない。
- ③ 音質に対する官能評価試験では定量的な評価は非常に難しい。更に可聴域外の超高周波音を考慮した音質向上を行う際に、被験者の音質の評価が可聴域内の周波数帯の音色に偏ってしまう可能性がある。

従って、打楽器シンバルの音質向上を最終目的と設定し、本研究ではシンバルが発する可聴域外の超高周波音も考慮した録音・解析・評価を行う。

加えて、製造方法改善を目的とする音質評価を行うために、打楽器シンバルを構成する形状、加工方法、使用材料に着目し、各々の条件についての録音・解析・評価

と音圧差異の発生要因調査を並行に行い、より良い音質を発するため最適条件を究明する。

最後に、官能試験に代わる音質評価手法として、人間の生体反応である「脳波」を計測・解析する事による統計学的評価手法を用いた音質評価手法の開発を試みる。

## 2. シンバルの録音・解析

シンバルは単一の材料から打楽器として機能するまで様々な工程を経る。そこで、シンバルの音色を構成する要素を大きく3つに分類し、各要素の音質評価を試みる。分類する3要素は以下に記す。

### (1) シンバルの形状比較

形状の異なるシンバルを図1に示す。K社とS社が製造した16インチのクラッシュシンバルである。K社のシンバルはS社のシンバルに比べて、カップ部分が大きく作られており、シンバル自体も高く作られている。周波数解析結果を図2に示す。



(a) The cymbal made by K



(b) The cymbal made by S

Fig.1 16 inch cymbals which has different shapes

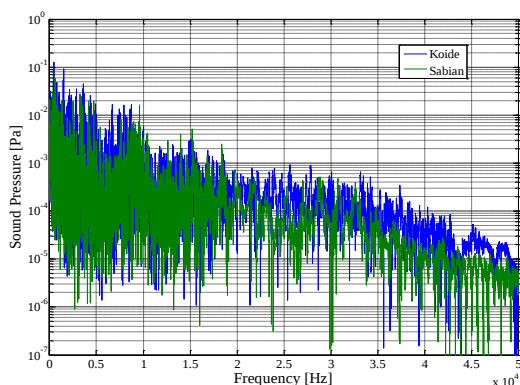


Fig.2 frequency domain comparison (Shape)

図 2 より、可聴域内の周波数特性は 5kHz あたりで音圧が低下する特徴が似ている。一方で、可聴域外の周波数特性は両シンバルが似た傾向はなく、20～50kHz の領域内で K 社製のシンバルは音圧が大きい。

## (2) シンバルの加工方法比較

工程中で最も職人の経験・勘を必要とする「ハンマリング」に注目し、ハンマリング工程の強弱による比較を行う。使用したハンマリング工程強弱別のシンバルを図 3、周波数解析結果を図 4 に示す。

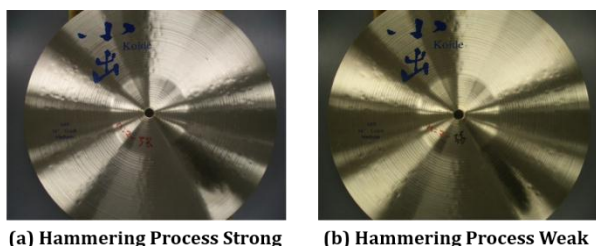


Fig.3 16 inch cymbals made through different making process

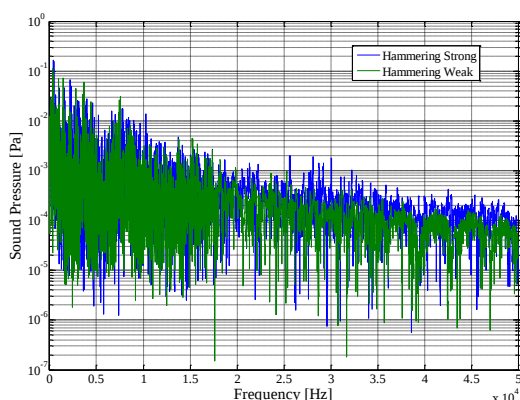


Fig.4 frequency domain comparison (Hammering)

図 4 より、形状比較時に比べ可聴域内の周波数特性の傾向は類似しており、ピークも一致している。両シンバルで音圧差が生じているのは可聴域外の周波数特性であり、25～30kHz においては明確な音圧差が現れていて、

明らかに「ハンマリング」工程の強いシンバルが高周波数の音を出している。

## (3) シンバルの使用材料比較

材料は伝統的に青銅が用いられる。各メーカーは音色に付加価値を加える意味で、鉄やリンなどの金属を少量添加している。そこで、錫の含有率と第 3 種金属の異なる 3 種類の使用材料による音色の比較を行った。材料比較の検討に使用したシンバルを図 5、各使用材料を表 1、周波数解析結果を図 6 に示す。

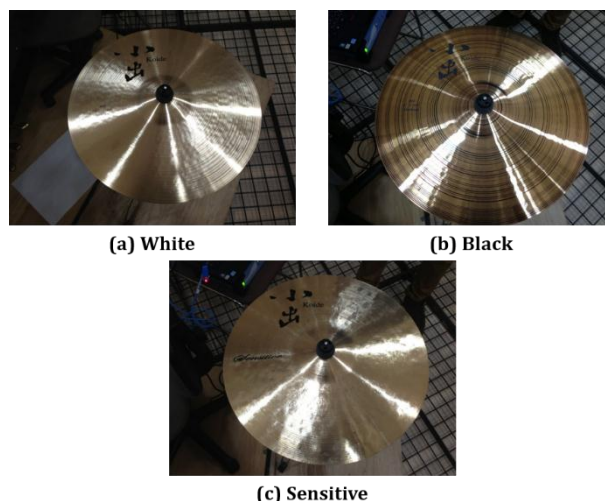


Fig.5 16 inch crash cymbals made of a different material

Tab.1 used material

|          | White        | Black            | Sensitive         |
|----------|--------------|------------------|-------------------|
| Material | Sn 21%<br>Fe | Sn 8%<br>P 0.09% | Sn 23%<br>Ti 0.3% |

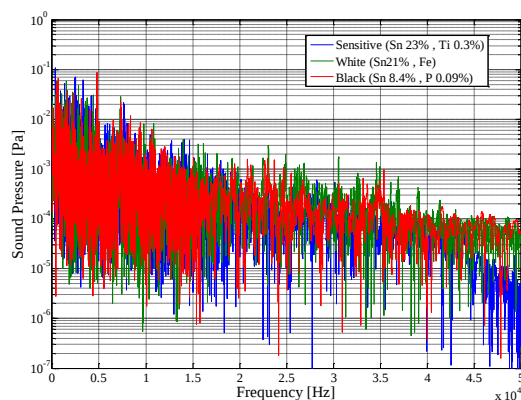


Fig.6 frequency domain comparison (Material)

図 6 から、可聴域内の周波数帯域について 5kHz まで P 含有のシンバルの音圧が低い。5～15kHz あたりでは 3 種類の音圧差はほとんど見られない。可聴域外については、Ti 含有のシンバルのみ明らかに音圧が低下している。

### 3. シンバルの音質評価

#### (1) 1/1 オクターブバンド分析

FFT 解析比較のみでは高周波音の差異を検出する事が困難であり、また人為的に打撃加振するために実験の誤差も大きかった。そこで新たな周波数解析手法として、1/1 オクターブバンド分析による比較を試みた。オクターブバンド分析は人間の耳に感じる周波数特性に従い等比的であり、聴感を考慮する上で非常に重要である。表 2 にオクターブバンド周波数を示す。また、オクターブバンド分析は式(1)、(2)を用いて行った。

Tab.2 1/1 octave band frequency

| Band No. | Lower [Hz] | Center [Hz] | Higher [Hz] |
|----------|------------|-------------|-------------|
| 27       | 353.6      | 500         | 707.1       |
| 30       | 707.1      | 1000        | 1414.2      |
| 33       | 1414.2     | 2000        | 2828.5      |
| 36       | 2828.5     | 4000        | 5656.9      |
| 39       | 5656.9     | 8000        | 11313.8     |
| 42       | 11313.8    | 16000       | 22627.2     |
| 45       | 22627.2    | 32000       | 45254.8     |

波形 $x(t)$ のフーリエ変換後の振幅を $F(\omega)$ とすると、 $F(\omega)$ におけるバンドナンバー $n$ の中心周波数 $f_n^m$ における音圧レベル $L_n$ は

$$L_n = \sqrt{\sum_{f_n^L}^{f_n^U} F(\omega)^2} \quad (1)$$

ただし、中心周波数 $f_n^m$ における上限周波数 $f_n^U$ と下限周波数 $f_n^L$ はそれぞれ、

$$f_n^U = \sqrt{2} \cdot f_n^m, f_n^L = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot f_n^m \quad (2)$$

#### (2) 統計分析

分散分析を実験誤差とシンバルの違いによる効果を区別するために採用した。因子 $A$ として「シンバルの種類」、因子 $B$ として「録音方向」を採用し、各中心周波数、計測距離別に分散分析を行う事で、シンバルの種類による音圧の有意差と録音方向による音圧の有意差を検定する。分散分析による検定結果の構成表を表 3 に示す。

Tab.3 analysis of variance table

| Factor       | $S$              | $\phi$              | $V$                                                 | $F_0$                | $F(\alpha)$                            |
|--------------|------------------|---------------------|-----------------------------------------------------|----------------------|----------------------------------------|
| $A$          | $S_A$            | $\phi_A$            | $V_A = S_A/\phi_A$                                  | $V_A/V_e$            | $F(\phi_A, \phi_e; \alpha)$            |
| $B$          | $S_B$            | $\phi_B$            | $V_B = S_B/\phi_B$                                  | $V_B/V_e$            | $F(\phi_B, \phi_e; \alpha)$            |
| $A \times B$ | $S_{A \times B}$ | $\phi_{A \times B}$ | $V_{A \times B} = S_{A \times B}/\phi_{A \times B}$ | $V_{A \times B}/V_e$ | $F(\phi_{A \times B}, \phi_e; \alpha)$ |
| $e$          | $S_e$            | $\phi_e$            | $V_e = S_e/\phi_e$                                  |                      |                                        |
| $T$          | $S_T$            | $\phi_T$            |                                                     |                      |                                        |

分散分析表を用いた検定は誤差分散 $V_e$ から各要因の分散比を求め、 $F$ 分布表の危険率 $\alpha$ の限界値と比較して判定を行った。有意性の有無が明らかになった要因に対して主効果の算出をする事で、シンバルの音圧の比較を行った。第 $i$ 水準 $A_i$ 、第 $j$ 水準 $B_j$ における $k$ 回目の計測データを $y_{ijk}$ とするとデータ構造式は式(3)のようになる。

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad (3)$$

ただし、 $\mu$ 一般平均、 $\alpha_i$ は第 $i$ 水準 $A_i$ 、 $\beta_j$ は第 $j$ 水準 $B_j$ の主効果、 $(\alpha\beta)_{ij}$ は交互作用効果、 $\epsilon_{ijk}$ は実験誤差を表す。主効果は下式(4)を用いて算出した。

$$\alpha_i = \bar{y}_{i\cdot} - \mu, \beta_j = \bar{y}_{\cdot j} - \mu \quad (4)$$

ただし、 $\bar{y}_{i\cdot}$ は第 $i$ 水準 $A_i$ の平均値、 $\bar{y}_{\cdot j}$ は第 $j$ 水準 $B_j$ の平均値である。

#### (3) 検定評価結果

録音・検定評価を行った結果を以下に示す。

##### a) シンバルの形状比較

形状比較の種類による主効果比較結果を図 7 に示す。

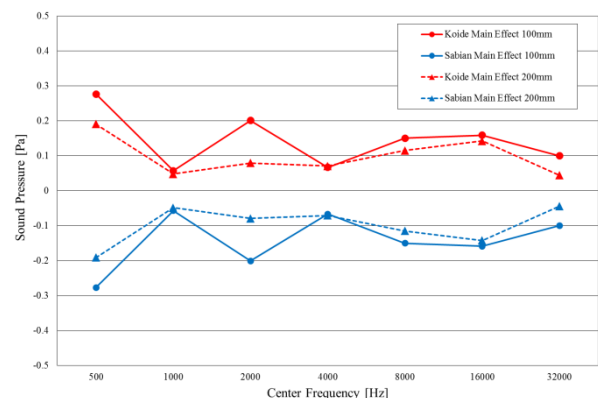


Fig.7 main effect comparisons of cymbals have different shapes

距離減衰の影響により全体平均音圧や各主効果が低下していく中、1000Hz、4000Hzにおける主効果は低下しなかった。他の周波数帯域が距離に比例して主効果が低下すると仮定すると、形状差異において最も影響を及ぼす可聴域内の中心周波数は1000Hzと4000Hzと考えられる。

#### b) シンバルの加工方法比較

加工方法比較の種類による主効果比較結果を図 8 に示す。

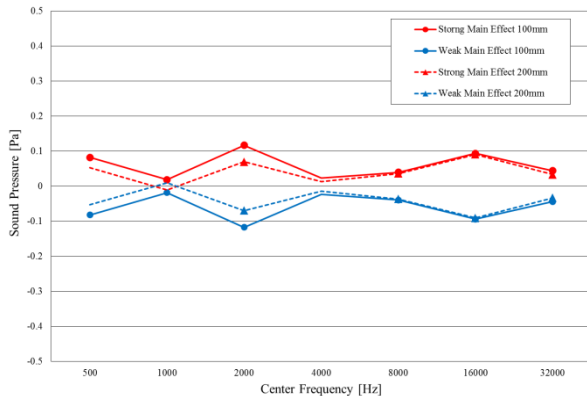


Fig.8 main effect comparisons of cymbals made through different process

計測距離 200mm においては中心周波数 500Hz, 1000Hz, 4000Hz の有意差が認められなかった。ハンマリング工程は中心周波数 500Hz, 1000Hz, 4000Hz の音圧分布に影響を与えないと思われる。加えて 2000Hz における主効果が距離に応じて低下していることから、計測距離を伸ばす事で有意差はなくなるとと思われる。中心周波数 8000Hz, 16000Hz, 32000Hz における主効果の差は距離に応じてほとんど低下しなかった。他の周波数帯域が距離に比例して主効果が低下すると仮定すると、ハンマリング工程において影響を及ぼす中心周波数は 8000Hz, 16000Hz, 32000Hz と考えられる。

#### c) シンバルの使用材料比較

材料比較の種類による主効果比較結果を図 9 に示す。

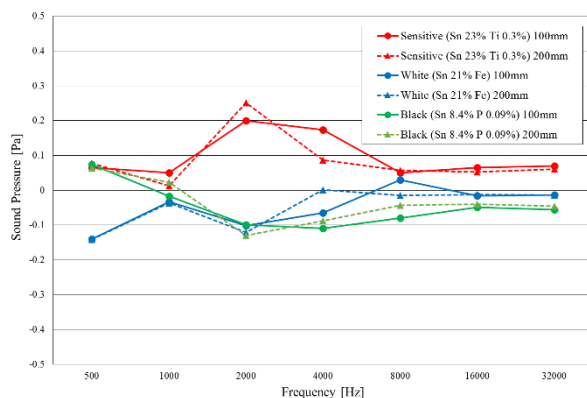


Fig.9 main effect comparisons of cymbals made of different materials

中心周波数 500Hz, 16000Hz, 32000Hz において主効果の差が距離に応じてほとんど変化しなかったため、3 種類の使用材料において最も影響を及ぼす中心周波数は 500Hz, 16000Hz, 32000Hz と考えられる。しかし、各々

の材料で音圧分布の傾向が異なっている。これは Sn の添加率と 3 種類目の添加率を変えた事による相互作用と考えられ、別々に検討する必要があると思われる。

#### d) シンバルの録音方向比較

加工方法比較の録音方向による主効果比較結果を図 10 に示す。今回の録音方向評価において 3 要素共に主効果比較結果に同一の傾向が見られた。

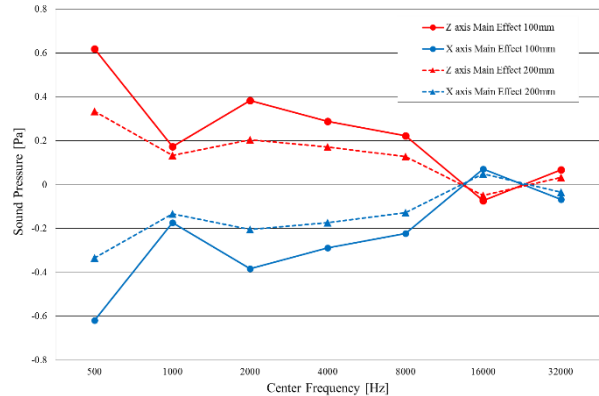


Fig.10 main effect comparisons of recording direction

中心周波数 16000Hz, 32000Hz において録音方向の主効果がシンバルの種類の主効果を下回る傾向が見られた。これは、一部の可聴域を含む超高周波音圧はシンバルの種類により大きく変化する傾向を表しており、シンバルの超高周波音検討の際には、録音方向でなく、シンバルの種類による検討を重点的に行うべきだと考えられる。

### 4. 各シンバル構成要素における調査・実験

シンバルの録音評価において明らかとなった中心周波数の有意差がどのような要因で発生しているかを明確にするために各要素で異なる実験を行った。

#### (1) シンバルの形状比較

断面形状の違いにより形状の剛性が変化する。モデル化した 2 種類の形状比較シンバルに対して、Nastran を用いた静解析シミュレーションを行い、シンバルを中心固定し、先端に 50[N] の荷重を加えた際の最大変位を計算した。使用したシンバルモデルの詳細を表 4, 使用物性値を表 5, 計算結果を表 6 に示す。

Tab.4 specification of cymbal models

| Cymbal | Elements | Nodes  | Mass [kg] | Error [%] |
|--------|----------|--------|-----------|-----------|
| K      | 127564   | 256805 | 1.133     | 0.875     |
| S      | 128268   | 258292 | 1.110     | 0.541     |

Tab.5 used physical property of bronze

| Young's Modulus<br>[MPa] | Poisson's Ratio<br>[-] | Density<br>[g/cm <sup>3</sup> ] |
|--------------------------|------------------------|---------------------------------|
| $1.1 \times 10^5$        | 0.38                   | 8.8                             |

Tab.6 simulated results

|                       | K    | S    |
|-----------------------|------|------|
| Max Displacement [mm] | 13.2 | 19.8 |

両シンバルの厚さと質量が変わらないにも関わらず剛性に変化が存在する事から、シンバルを構成するカップとボウのバランスが影響を与えると思われる。最も影響を及ぼす中心周波数は 1000Hz と 4000Hz である。今回は 2 種の形状差異のみでの考察であり、その他の中心周波数帯域を制御できる可能性が考えられる。

## (2) シンバルの加工方法比較

ハンマリング工程後に数ヶ月寝かせてから次の工程に移る事でシンバルらしい高音が顕著に出てくるという。今回はハンマリング工程直後の 2 枚のシンバルを 3 ヶ月間録音し、音圧の変化を観察した。3 ヶ月後の比較結果を図 11、4 ヶ月後の比較結果を図 12 に示す。

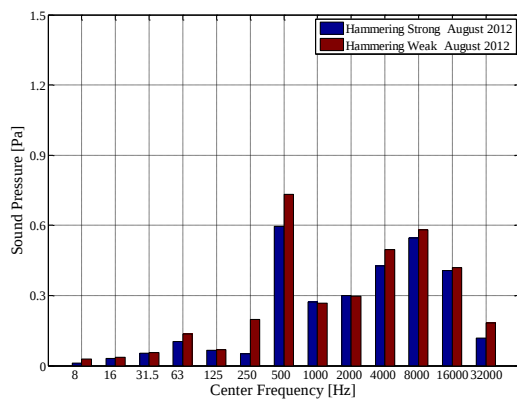


Fig.11 octave band comparison (3 months later)

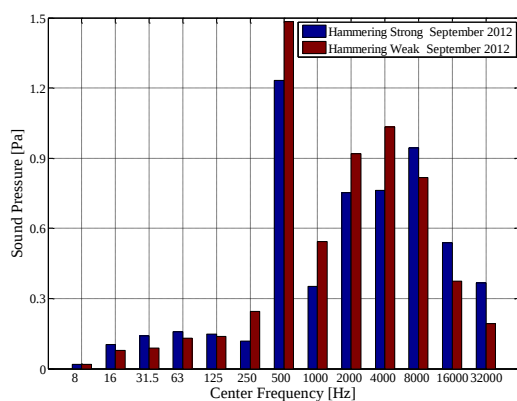


Fig.12 octave band comparison (4 months later)

4 ヶ月後に急速に音圧分布が変化し、ハンマリング強シンバルの中心周波数 8000Hz～32000Hz における音圧がハンマリング弱シンバルを上回った。ハンマリング工程を経たシンバルが時間経過と共に高周波帯域の音圧に変

化を与える可能性が考えられる。

## (3) シンバルの使用材料比較

研究対象とした 3 種類の青銅合金に対して物性値の計測を行った。材料一般の性質として、硬いと変形しにくいといった相関関係がある。硬度試験は比較的簡単に検査できるため、 $\mu$  ビッカース硬さ試験により変形しにくい材料を明確にする。今回の計測では、試験力  $F = 5 [kgf]$  と設定して、各材料片に対して 5 回ずつ測定し平均化処理を行った。

5 回平均の計測結果を図 13 に示す。

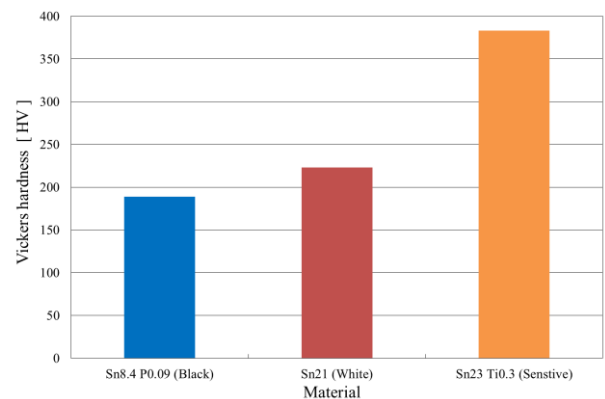


Fig.13 Vickers hardness measurement result

3 種類のシンバルの中で超高周波音の主効果が 1 番高かった Sensitive に使用されている Ti 含有青銅の硬度が最も高いという結果になった。超高周波の主効果の傾向とビッカース硬さの傾向は一致しており、材料硬度と超高周波音の交互関係が推測された。

## 5. 生体反応を用いた音質評価

### (1) 概要

可聴域外の周波数も豊富に含んだ音色についてはインドネシアの伝統楽器であるガムランを用いた研究例が有名であり、超高周波音を含んだ音色に対して「脳波」を計測・解析し、 $\alpha$  波成分を調べる事で音質の良否を行っている。本研究においても超高周波音を考慮している点から、「脳波」を用いた音質評価を採用した。

### (2) 計測対象生体反応

#### a) 脳波について

脳波 (EEG) とは、人・動物の脳から生じる電気活動を頭皮上などに置いた電極で記録したものである。表 7 に示すように各周波数帯がそれぞれ異なった生理学的な意味を持っている。今回は  $\alpha$  波と  $\beta$  波を評価対象とした。

Tab.7 Types of EEG and appearance conditions

| Types            | Frequency, Hz | appearance condition |
|------------------|---------------|----------------------|
| $\delta$ (delta) | 1~3           | Sleeping (Deep)      |
| $\theta$ (theta) | 4~7           | Sleeping             |
| $\alpha$ (alpha) | 8~13          | Get relaxed          |
| $\beta$ (beta)   | 14~26         | Be concentrated in   |
| $\gamma$ (gamma) | 27~70         | Feeling the fear     |

#### b) 使用脳波計

使用脳波計は図 14 に示す Neuro Sky 社製の 1 チャンネル簡易脳波計である。ベルト中央部の 2 箇所との接点とフック状の端子から前頭葉と側頭葉の電位差を計測し、意識を支配する前頭葉の脳波データを得ている。



Fig.14 EEG measurement equipment

### (3) 脳波計測方法

#### a) 計測条件

脳波計測は被験者をシンバルから 1[m]離れた位置に着座した状態で、無響音質内で計測を行った。脳波計から出力され解析ソフトにて処理された計測データのうち、時間波形の CSV データを MATLAB により解析した。

#### b) シンバル打撃方法

テンポ 60, 90, 120 の 3 パターンによる録音結果から超高周波帯域の有意差はないと検定されたため、テンポ 120 で約 20 秒間の打撃を行った。

#### c) 脳波解析方法

今回の脳波解析では、周波数分解能  $\Delta f = 1 [Hz]$  になるように、計測データを 1 秒刻みに分割して周波数解析を行った。手動で計測開始と終了を制御するため、端数となったデータは解析対象から除外した。

#### d) 脳波評価方法

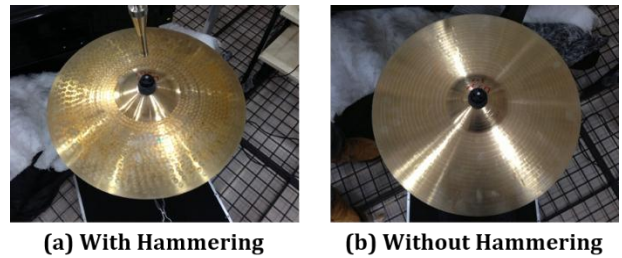
$\alpha$  波帯と  $\beta$  波帯から数値評価を行っていく上で「試聴の間に  $\alpha$  波帯と  $\beta$  波帯のパワーがどれだけ大きく算出されたのか」を表現する脳波評価指標として、シンバル視聴時に計測された  $\alpha$  波帯域のパワー総和  $P_\alpha$ 、および  $\beta$  波帯域のパワー総和  $P_\beta$  を算出した。ある時刻  $t [s]$ ,  $f [Hz]$  における脳波のパワーを  $V_t^f [\mu V^2/s]$  とすると、 $\alpha$  波帯域のパワー総和  $P_\alpha [\mu V^2]$ ,  $\beta$  波帯域のパワー総和  $P_\beta [\mu V^2]$  は

$$P_\alpha = \sum_{t=0}^{t_e} \left( \sum_{f=F_{\alpha_{min}}}^{F_{\alpha_{max}}} V_t^f \right), P_\beta = \sum_{t=0}^{t_e} \left( \sum_{f=F_{\beta_{min}}}^{F_{\beta_{max}}} V_t^f \right) \quad (5)$$

$t_e [s]$  は計測終了時間,  $F_{\alpha_{min}}, F_{\alpha_{max}}, F_{\beta_{min}}, F_{\beta_{max}} [Hz]$  はそれぞれ各脳波帯域の下限周波数と上限周波数である。

### (4) 脳波評価結果

評価試験として製作途中のシンバルの比較を行った。評価試験用に用意されたシンバルは図 16 に示すシンバルである。今回の評価試験に先立ち、図 16 に示したシンバルのオクターブバンド分析結果を図 17 に示す。



(a) With Hammering (b) Without Hammering

Fig.16 16 inch prototype cymbals made through different making process

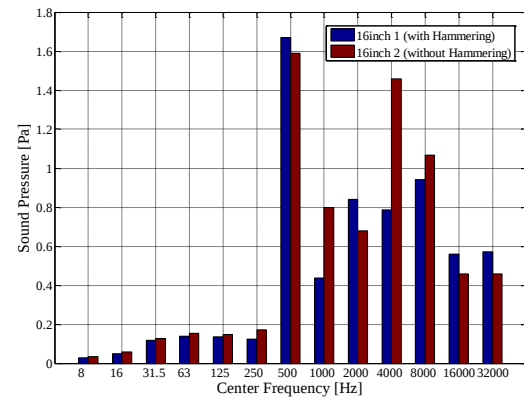


Fig.17 1/1 octave band analysis comparison

被験者を 10 人と設定して行った脳波評価試験結果を図 18 に示す。

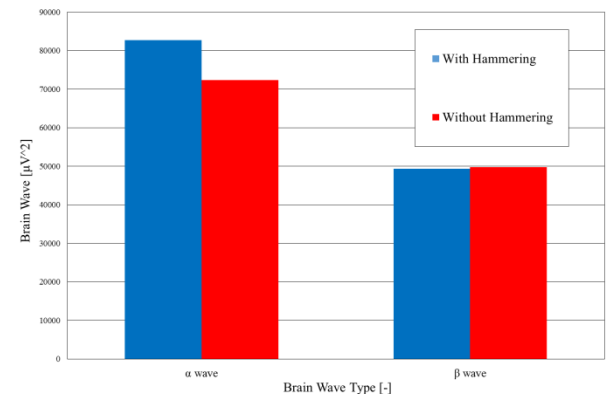


Fig.18 sound quality evaluation test result

2種の16インチシンバルは被験者によって $\alpha$ 波帯域のパワー総和 $P_{\alpha}$ 、 $\beta$ 波帯域のパワー総和 $P_{\beta}$ の優劣が異なった。全体和は、ハンマリング工程を経たシンバルのパワー総和 $P_{\alpha}$ は高く、 $P_{\beta}$ は低い結果になった。中心周波数32000Hzの音圧が高いシンバルにおける $\alpha$ 波帯域のパワー総和が他の試験においても高いことから、超高周波領域がリラックス効果に影響するものと思われる。 $\beta$ 波帯域の全パワー総和は優劣が小さいものの、シンバルごとに異なる結果となり、可聴域外の音圧に依存しないことから可聴域内の音圧のバランスが集中効果に影響するものと思われる。

#### (5) 新たな音質評価手法の提示

音質評価試験において被験者1人1人のパワー総和を比較すると値が大きく異なっているため、シンバルの種類によるパワー総和の主効果を算出しようと試みたが、いずれも有意にはならなかった。

そこで、新たな音質評価指標としてシンバル試験時の各帯域のパワー総和を各被験者の平常時に計測した各帯域のパワー総和と比較する事で「平常時と比較して試験の間に $\alpha$ 波帯と $\beta$ 波帯のパワーがどれだけ大きく算出されたのか」を算出した。平常時脳波の1秒当たりの $\alpha$ 波帯域パワー $P_{\alpha_s}[\mu V^2/s]$ 、 $\beta$ 波帯域パワー $P_{\beta_s}[\mu V^2/s]$ を算出した後に、平常時と比較した $\alpha$ 波帯域のパワー総和 $P_{\alpha}[\mu V^2]$ 、 $\beta$ 波帯域のパワー総和 $P_{\beta}[\mu V^2]$ を算出する。

$$P_{\alpha} = \sum_{t=0}^{t_e} \left\{ \sum_{f=F_{\alpha_{\min}}}^{F_{\alpha_{\max}}} (V_t^f - P_{\alpha_s}) \right\} \quad (6)$$

$$P_{\beta} = \sum_{t=0}^{t_e} \left\{ \sum_{f=F_{\beta_{\min}}}^{F_{\beta_{\max}}} (V_t^f - P_{\beta_s}) \right\} \quad (7)$$

式(5)を用いた脳波評価指標と、式(6)、(7)を用いた脳波評価指標による比較を行った被験者の個人計測結果を図19、20に示す。

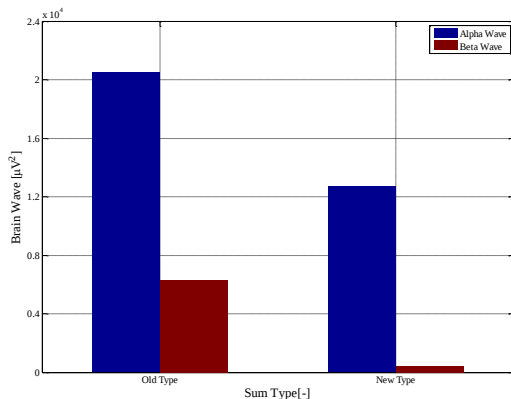


Fig.19 calculation method comparison (person1)

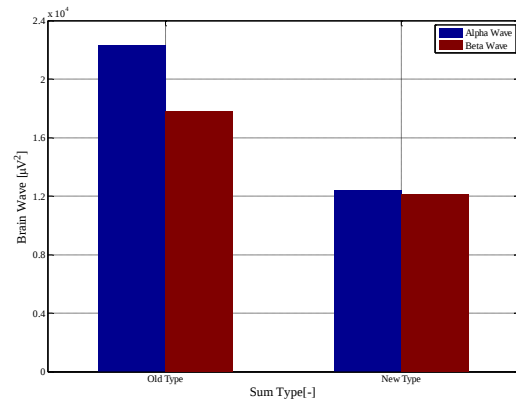


Fig.20 calculation method comparison (person2)

図19、20から、 $\alpha$ 波帯域のパワー総和は低下したと同時に $\beta$ 波帯域のパワー総和も低下して両パワー総和のバランスが変化した。加えて、16000~23000[μV²]あった $\alpha$ 波帯域のパワー総和の差異が8000~12000[μV²]まで減少したことから、被験者により異なる平常時脳波を評価に考慮する事で評価精度は向上すると思われる。

## 6. 結論

本研究では、そのシンバルを構成する要素を3つに分けてシンバル音の超高周波音の研究を行った。続いて要因別にシンバル音を構成するパラメータの抽出を行い、最後に超高周波帯域を考慮した際の音質評価手法の開発を試みた。これらの結果からシンバル音を構成する要素を抽出すると同時に、超高周波領域を考慮した際の音質評価手法の基礎を築く事が出来た。

### (1) シンバルの録音・解析

シンバル音の基本的な特性が分かった。50kHzに及ぶ超高周波帯域まで複雑に分布しており、単純な周波数解析により優劣を評価するのは困難だった。可聴域外の超高周波音は0.6s程で減衰してしまう事が分かった。

### (2) シンバルの録音評価

従来の周波数解析に代わりオクターブバンド分析を採用する事で、各要素別のシンバルにおける周波数特性の差異を明確にすることができた。誤差を考慮した上で、要素別のシンバルの優劣を明確にするために分散分析を用いた検定を行い、各要素におけるシンバルの音圧差を明確にできた。

### (3) 各シンバル構成要素における調査・実験

形状比較では形状の剛性、加工方法比較ではハンマリング工程の差異による音圧の時間変化、使用材料比較ではビッカース硬さ試験による材料の硬度計測を行った。その結果、第3章で有意差を検出した主効果の差がどのようなパラメータに依存しているのかを確認できた。

#### a) シンバルの形状比較

静解析シミュレーションの結果、K 社製シンバルの剛性が高くなった。録音評価から、形状の違いにより中心周波数 1000Hz, 4000Hz に影響を与える結果が出ていることから、形状の剛性は主として可聴域内の周波数帯域に影響を与える。

#### b) シンバルの加工方法比較

ハンマリング工程の強弱により時間経過と共にハンマリング強の超高周波音圧が上昇した。中心周波数 8000Hz ~ 32000Hz において、時間経過と共に優劣が逆転した事に加え、録音評価からも 8000Hz ~ 32000Hz の有意差が認められた事から、ハンマリング工程は主として可聴域外を含む高周波領域に影響を与える。

#### c) シンバルの使用材料比較

ビッカース硬さ試験結果から、超高周波帯域とビッカース硬さの傾向が一致した。そのため、使用材料は主として 16000Hz, 32000Hz の超高周波帯域に影響を与える。しかし、可聴域内の中心周波数においては各使用材料で音圧のバランスが異なっている事から、Sn の添加率と 3 種類の合金を分けて検討する必要がある。

### (4) 生体反応を用いた音質評価

超高周波領域を含んだ音質評価を行う上で、生体反応の一つとして脳波を取り上げ、音質評価手法の構築を試みた。音質評価に必要なと考えられた 2 つの指標を採用した。その結果、癒し効果を意味する  $\alpha$  波では可聴外領域の優劣により変化する傾向が見られ、集中効果を意味する  $\beta$  波では可聴域内の音圧のバランスによる被験者の好みで変化する傾向が見られた。この事から  $\alpha$  波及び  $\beta$  波を共に評価する事により高周波領域まで考慮した音質向上のために評価方法を確立できると考えられる。

最後に、平常時脳波と相対比較する事による音質評価手法を提示した。被験者を設けてシンバルごとに評価す

る事は出来なかったが、新しい脳波評価方法によるシンバルの評価を行うと同時に、一般的な官能評価を用いて脳波評価方法との比較を行う必要がある。

### 謝辞

本論文は筆者が法政大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程に在籍中の研究成果をまとめたものである。同専攻教授の御法川学先生、機械工学科の岩原光男先生には指導教授として本研究の実施の機会を与えて頂き、終始懇切丁寧にご指導頂いた。ここに深謝の意を表する。また、共同研究者として多くのご助言頂いた明治大学の酒井哲也先生に感謝の意を表する。

本研究を行うに当たり、試作シンバルの付与、貸与を始め、研究方針に関する助言、録音実験にご協力くださった小出シンバルの小出俊雄氏に厚く御礼申し上げる。最後に、本専攻振動音響研究室の各位には日頃より有益なご助言を頂いた。ここに感謝の意を表する。

### 参考文献

- 1) 伊藤勇太. 打楽器シンバルの音質向上. 東京都: 法政大学, 2004
- 2) 湯浅圭介. 構造最適化によるシンバルの音質向上. 東京都: 法政大学, 2003
- 3) 酒井哲也. 癒しの音質からのアプローチ. 神奈川県: 明治大学, 2012
- 4) 仁科エミ. ハイパーソニックエフェクトの発現メカニズムに関する研究の進展. 千葉県: メディア教育開発センター, 2009
- 5) 小林一行. MATLAB ハンドブック. 東京都: 秀和システム, 2004
- 6) 中里博明, 川崎浩二郎, 平栗昇, 大滝厚. 実験計画法テキスト. 東京都: 日科技連, 1993
- 7) 長松昭男. モード解析入門. 神奈川県: コロナ社, 1993