

音響解析と官能評価によるシンバルの音質向上に関する研究

中西, 俊貴 / NAKANISHI, Toshiki

(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)

57

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

8

(発行年 / Year)

2016-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00012988>

音響解析と官能評価による シンバルの音質向上に関する研究

A Study on improve sound quality of cymbals using acoustic analysis and sensory evaluation

中西俊貴

Toshiki NAKANISHI

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

Many researches on sound quality improvement have been conducted in various musical instruments focusing on human audibility. However, current researches indicate that ultra-high-frequency over 20 kHz called human audibility limit affects sound quality. Therefore, the main purpose of this research is to clarify the effect of various elements that contribute to the sound quality of cymbal by experiments including over human audibility range. Further, the effect of changes in the exciting force is given to sound pressure is investigated by the numerical simulation. In addition, Sound quality evaluation of each cymbal is conducted in using sensory evaluation. As a result, Recording experiments clarify the differences in frequency characteristics with the cymbal components. Furthermore, the simulation results are found to correspond with the experimental ones. Moreover, sensory evaluation reveals that effects of sound pressure level difference are given to audience.

Key Words : Octave band analysis, Analysis of variance, Numerical simulations, Sensory evaluation

1. 緒言

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。一方、楽器のように発生音が本来の性能である場合には、音質が重要になってくる。これまでに様々な楽器に対して音質向上の研究[1][2]が行われてきた。しかし、これらの研究では以下の課題が残されていた。

- ① 従来の楽器の音質向上に関する研究では、音質に関わっている周波数帯域は限定され、人間が本来聴き取っている音質とは異なるものであった。しかし、最近では、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[3][4]が報告され、音質向上を目指す上で可聴域外の超高周波音をも考慮する必要が生じてきた。
- ② 音質向上に関する研究は従来多く行われているが、そのほとんどは楽器の製造にまで踏み込まれていない。そのため、実際に音質向上を実現する製品・製造には設計や加工にまで踏み込んだ発生音のメカニズムの解明が必要である。
- ③ 音質向上を目指す上で、聴衆者がどう評価するか明確にする必要がある。そのため、録音・解析による音質評価だけでなく官能評価試験を行うことが求められる。

従って、本研究では超高周波音を発することの出来る打

楽器シンバルを研究対象とし、シンバルの製品開発に繋がる音質向上を最終目的と設定する。さらに、製品の設計・製造に役立てるために打楽器シンバルを構成する要素である形状・加工方法・使用材質・板厚に着目し、各々の条件について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。さらに、放射音予測プログラムによる数値解析で加振力が変化したことによって発生音圧に与える影響について数値的に明らかにする。最後に、音質評価として各シンバルが有する音質の違いが聴衆者に与える影響について官能評価試験によって明らかにする。

2. シンバル音の録音・解析

(1) 研究対象シンバル

シンバルは板材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カップ形状・加工方法・材質・板厚の4つに分類し、それぞれを比較することによる音質評価を試みる。

a) シンバルのカップ形状

シンバルは大きく分けてカップ、ボウ、エッジの3つの形状から成る。このカップ形状違いを比較するため、同材質でカップ形状のみが異なる 16inch クラッシュシンバルを使用する。図1と表1に両シンバルの測定した主な形状

寸法を示す。20inch Cup はこれまで 20inch クラッシュシンバルに用いられていたカップ形状を 16inch クラッシュシンバルに適用したものである。両図より 20inch Cup は 16inch Cup に比べて、カップ部の径が大きい。このカップ部の形状違いが、超高周波音を含む周波数特性に影響を与える可能性がある。

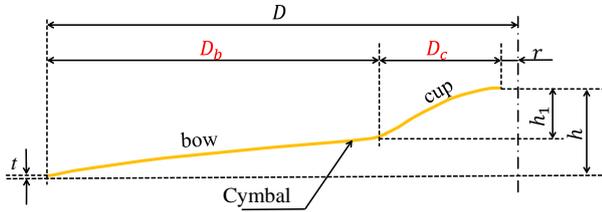


Fig.1 Dimensions of Cymbals

Table 1 Measurement data of two cymbals

Name	t, (mm)	D_b , (mm)	D_c , (mm)	h, (mm)	h_1 , (mm)	m, (g)
16inch Cup	0.750	144.0	58.5	36.8	20.1	1158
20inch Cup	0.775	131.7	70.8	39.5	21.6	1148

b) 加工方法

シンバルは板材から切削加工、カップ成形、ハンマリング、音溝加工、修正を経て製造される。ここでは、各工程の中で最も職人の経験を必要とし、且つ豊かな音作りが可能といわれるハンマリング工程に注目した。工程の中で意図的にハンマリングの強さを变化させた同材質の2つのシンバルを用意し、その強弱による音質比較を行う。

c) 材質

材質には伝統的に青銅合金が用いられているが近年、各メーカーは音色に特徴を与えるために錫以外に鉄、チタン等の金属元素を少量添加して、独自の音作りをしている。そこで、錫の含有率と金属添加物違いの製品について、音色の比較を試みる。表 2 に、使用したシンバルの金属元素含有率を示す。なお、残りの金属元素は銅である。

Table 2 Materials

Name	Sensitive	Black
Material	Sn 21% Ti 0.3%	Sn 8% P 0.09%

d) シンバルの板厚

シンバルの板厚はシンバル自体の質量が大きく変化するため、シンバルの音色を構成する重要な要素である。

表 3 に両シンバルの測定した主な形状寸法を示す。両シンバルの材質は厚み以外の影響を排除するため同材質を使用している。両図より Thin のシンバルは Medium のシンバルに比べて、中心部の厚みやエッジの厚みが薄く製作

され、質量が軽くなっている。このシンバルの厚み違いが周波数特性に影響を与える可能性がある。

Table 3 Measurement data of two cymbals

Name	t, (mm)	t_1 , (mm)	D_b , (mm)	D_c , (mm)	m, (g)
Thin	0.64	1.51	144.8	58.8	915
Medium	0.71	1.19	145.4	57.1	1134

(2) 録音方法

本研究では人間の可聴域を大きく上回る周波数帯域も研究対象としているため、解析周波数は騒音計ユニットの解析可能限界の 50kHz、録音時間は、対象としている超高周波音の減衰が早いので 0.64s とする。加振点及び録音位置は図 2 に示す。シンバルの先端から 70mm の位置をヒコリー製のスティックで打撃を行い、録音を行う。コンデンサマイクフォンの設置位置は聴衆に近い条件を再現するために水平方向とした。

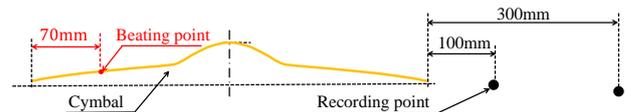


Fig.2 Beating and recording points

(3) 解析方法

録音により得られたデータを解析する際に FFT 分析およびスペクトログラムに加えて、オクターブバンド分析による比較を試みる。

a) 1/1 オクターブバンド分析

録音データを解析する際に、離散フーリエ変換を用いた周波数解析とスペクトログラムを用いた比較だけでは、高周波音の差異を明確に検出する事が困難であった。広帯域音を精度よく比較するため、1/1 オクターブバンド分析による各比較項目の比較を試みる。本分析は、人間の耳に感じる周波数特性に等比するため、聴感を考慮する場合の振動騒音評価に最適である。表 4 に、1/1 オクターブバンドの一覧を示す。式(1)に音圧レベル L_n の計算式を示す。

$$L_n = \sqrt{\sum_{f_{1n}}^{f_{2n}} F(\omega)^2} \quad (1)$$

ここで、波形 $x(t)$ のフーリエスペクトル振幅を $F(\omega)$ とすると、オクターブバンドナンバー n の中心周波数 f_{m_n} における音圧レベル L_n を求めることになる。表 4 に記されている中心周波数 f_{m_n} 、上限周波数 f_{2n} 、下限周波数 f_{1n} は次式となる。

$$f_{2n} = \sqrt{2} \cdot f_{m_n}, f_{1n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot f_{m_n} \quad (2)$$

Table 4 1/1 Octave band frequency

Band No. n	Lower limit Frequency f_{1n} [Hz]	Center Frequency f_{m_n} [Hz]	Higher limit Frequency f_{2n} [Hz]
18	44.5	63	89.1
21	88.4	125	176.8
24	176.8	250	353.6
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

b) 分散分析

本研究で着目している可聴域外の高周波音の音圧レベルは非常に小さく、人間による打撃で音を発生させているために実験誤差が大きくなる可能性がある。そのため、誤差とシンバルの違いによる影響を区別するため、分散分析による検定を実施する。ここで、因子Aに「シンバルの種類」、因子Bに「録音距離」を割り付け、録音回数を5回として分散分析を行うことで、オクターブバンドの中心周波数毎に、シンバルの種類別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5に示す。

Table 5 Analysis of variance table

Factor	S	ϕ	V	F_0
A	S_A	ϕ_A	S_A/ϕ_A	V_A/V_e
B	S_B	ϕ_B	S_B/ϕ_B	V_B/V_e
A × B	$S_{A \times B}$	$\phi_{A \times B}$	$S_{A \times B}/\phi_{A \times B}$	$V_{A \times B}/V_e$
e	S_e	ϕ_e	S_e/ϕ_e	
T	S_T	ϕ_T		

検定結果から各要因の分散比を求め、F分布表より求めた危険率5%における $F_{0.05}$ 値(4.49)に対して、この分散比 F_0 値が高いほどシンバルの違いによる影響が高度に有意であると言える。ここで、交互作用が有意でないと判定した場合には、交互作用の平方和を誤差項に繰り入れをするプーリングを行い、再度判定を行う。さらに、分散分析後、

オクターブバンドにおいて95%信頼区間の推定を行った。95%信頼区間とは、100回の標本調査のうち95回はデータ平均が収まる範囲を示している。

(4) 録音解析結果

上記の録音方法および解析方法から、シンバル構成要素に分類した比較項目ごとの結果を以下に示す。

a) シンバルのカップ形状

図3に16inch Cupを、図4に20inch Cupのスペクトログラムを示す。横軸が時間、縦軸が周波数を表し、音圧が高いほど赤く、低いほど青く表示される。可聴周波数限界である20kHzを超える超高周波数音は瞬時に減衰することが示されている。図5に、音圧のFFT解析結果を示す。可聴域内である20kHzまでは明確な差異はないが、可聴域を上回る超高周波帯域では16inch Cupの音圧が僅かに高い。

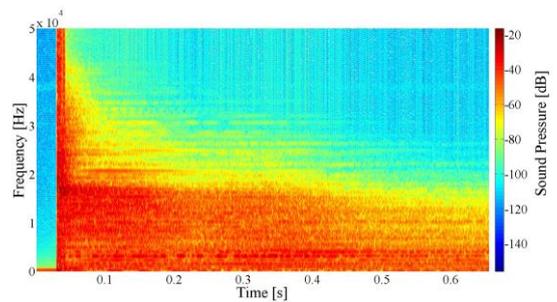


Fig.3 Spectrogram of 16inch cup cymbal

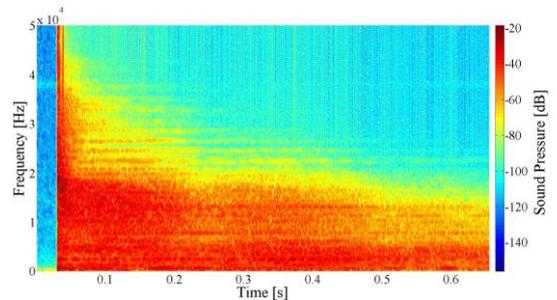


Fig.4 Spectrogram of 20inch cup cymbal

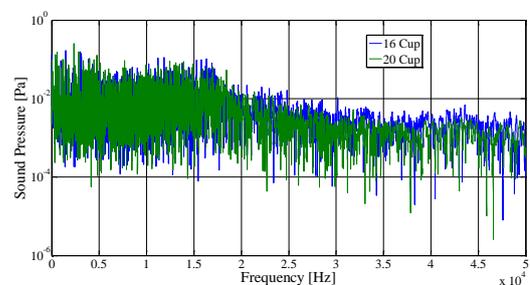


Fig.5 Frequency domain sound pressure

表6に各シンバル構成要素における中心周波数の分散比 F_0 を示している。この数値が高いほどシンバルによる影響が高度に有意である。このことから、カップ形状は中心周波数1000Hz、2000Hzに強く影響を与えていることが分か

る。図6に分散分析後に推定を施したオクターブバンド分析結果を示す。黒線は95%信頼区間を表している。オクターブバンド分析では音圧差異を明確にすることが可能となっている。中心周波数1000, 2000Hzでは20inch Cup シンバルの音圧を高く発生するが、16000, 32000Hzの高音域では、16inch Cup シンバルの音圧が高く発生する逆転現象が見られた。特に1000Hzで音圧差が顕著に現れた。これは表6に示した有意性の判定からも同様の結果が確認できる。ここで、FFT解析とスペクトログラムを用いた比較では、音圧レベルの差異が明確に見られないことから、以降の解析結果はオクターブバンド分析のみの結果を示す。

Table 6 Effect of Cup

Center Frequency [Hz]	Cup	Hammering	Material	Board thickness
63	1.89	2.36	1.46	38.0
125	0.475	53.0	5.79	4.25
250	5.90	5.89	9.04	1.15×10^{-4}
500	4.67	0.168	8.49	26.7
1000	30.9	14.4	3.13	6.57
2000	24.3	0.322	37.2	22.0
4000	4.34	0.0053	19.4	34.3
8000	6.47	5.32	67.6	52.7
16000	8.83	19.3	63.3	152
32000	12.0	5.60	137	145

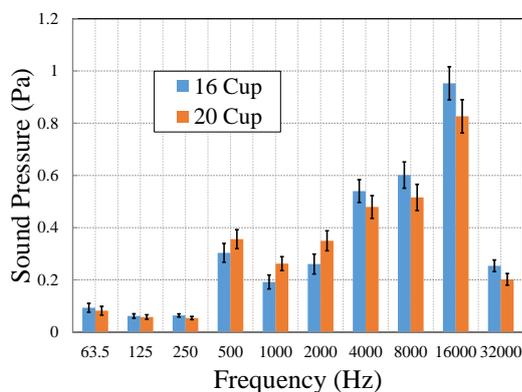


Fig.6 Octave band comparison result of Cup

b) 加工方法

表6より加工方法は中心周波数125Hzに最も影響を与えていることが分かる。図7に推定を施したオクターブバンド分析結果を示す。中心周波数125, 1000, 16000Hzでは

ハンマリング強のシンバルの音圧が高く発生している。特に125, 16000Hzで音圧差が顕著に現れている。

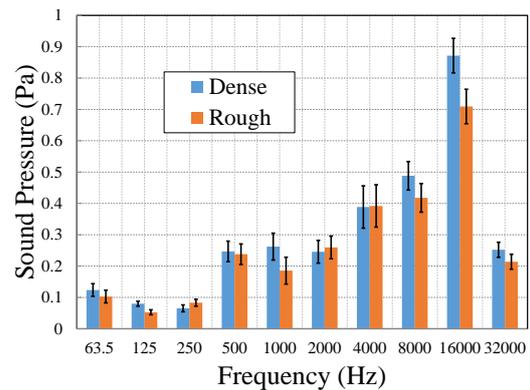


Fig.7 Octave band comparison result of hammering

c) 材質

表6より材質は多くの中心周波数に影響を与えているが、特に800Hz, 16000, 32000Hzに強く影響を与えていることが分かる。図8にオクターブバンド分析結果を示す。中心周波数2000, 4000, 32000HzではTi含有品の音圧が高く発生するが、8000, 16000Hzにおいては、P含有品の音圧が高く発生する現象が見られた。特に32000Hzで音圧差が顕著に現れている。

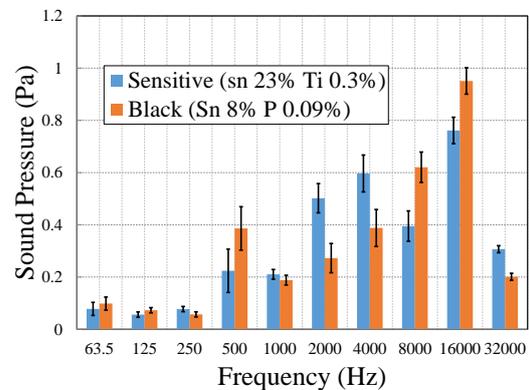


Fig.8 Octave band comparison result of material

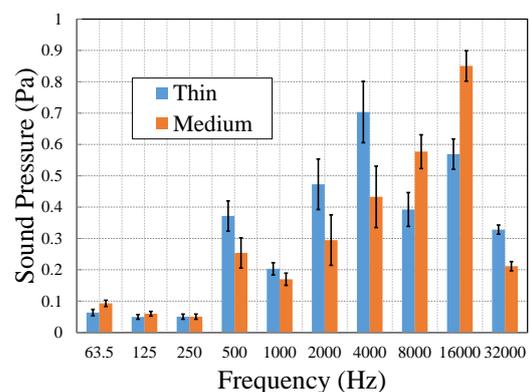


Fig.9 Octave band comparison result of board thickness

d) シンバルの板厚

表6より板厚も多く多くの中心周波数に影響を与えているが、特に、16000、32000Hz の高音域に強く影響を与えていることが分かる。図9にオクターブバンド分析結果を示す。中心周波数 500、2000、4000、32000Hz では Thin のシンバルの音圧が高く発生するが、8000、16000Hz の高音域においては、Medium の音圧が高く発生する現象が見られた。特に 16000Hz で音圧差が顕著に現れている。

3. 数値解析

(1) 放射音プログラムの概要

シンバルの打撃にはスティックが使用されているが、材質や先端形状は様々である。そのため、使用するスティックも発生音圧に影響を与えると考えた。そこで、加振力の変化が音圧の発生に与える影響を調査するために放射音予測プログラムを使用し、解析を行った。

プログラムによる解析手順[5]を簡易的に説明する。まず、解析対象の有限要素モデルを作成する。作成したモデルから固有値解析を行い固有値、固有モードを求める。モード減衰比は計算により理論値を求めることができないため実験モード解析により同定する。そして固有値、固有モード、モード減衰比、さらに対象に加える加振力を入力することで理論モード解析により有限要素モデル表面の全節点の振動速度を算出する。次にその表面全節点の振動速度とモデルの幾何形状から、速度ポテンシャルを利用して音を算出する。ここで、このプログラムでの計算は全て周波数領域で行われている。この理論モード解析から音圧レベルの算出までの一連の過程をプログラムが行っている。図10にフローチャートを示す。

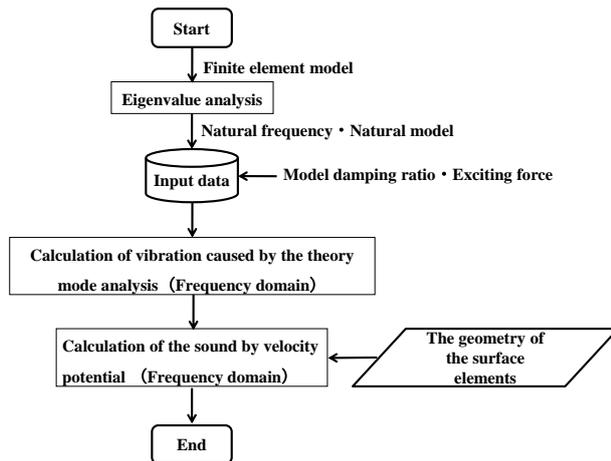


Fig.10 Flowchart of the numerical simulation

(2) プログラムの精度検討

数値計算を行う際、精度を検討する必要がある。そこで、先ず数値解析において必要となる加振力測定およびモード減衰比の同定を試みる。次に算出された加振力・モード減衰比を用いてスティック加振時とハンマー加振時の計算を行い、実験結果と比較することで精度を確認する。対

象シンバルには 16inch Cup を使用する。

a) ハンマーによる加振力測定及び録音実験

前章におけるスティックでの打撃では加振力を測定することが困難である。そこで、インパルスハンマでの打撃に変更し、加振力測定と録音を同時に行う。加振点及び録音条件は前章の録音実験と同条件を採用した。この測定によって得られた加振力を数値解析で使用する。

b) モード減衰比の同定

モード減衰比は摩擦、材料損失等の様々な原因が交錯しているため、理論的に減衰の大きさを求めることが出来ない。そのため、振動試験で測定した実験データを分析することで減衰の大きさを同定している。

図12に 16inch Cup シンバルでの実験結果と数値解析結果の FFT 解析を、図13にオクターブバンド分析結果を示す。図12より周波数帯域によっては誤差が見られる。これは、シンバルは多くの固有モードを有しているため実験値と完全一致するモード減衰比を同定するのは困難であったためである。図13より中心周波数での音圧レベルの発生や優劣などのグラフ傾向は実験値と類似していることが分かる。そこで、この調整したモード減衰比を使用し、加振力を変更した際の音圧レベルに与える影響の傾向把握を数値解析で行う。

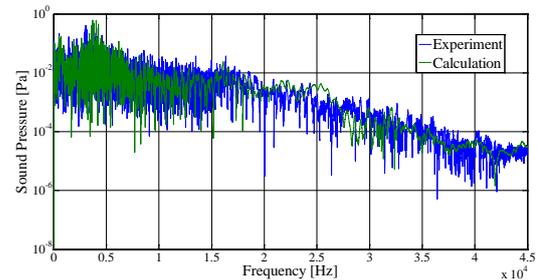


Fig.12 Comparison result of sound pressure

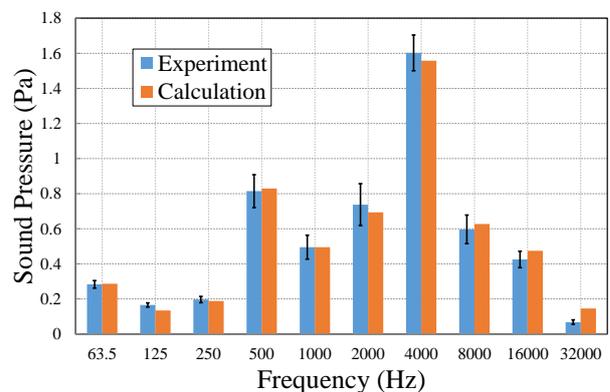


Fig.13 Octave band comparison result of sound pressure

c) スティックによる加振力算出

スティックによる加振力を周波数応答関数によって算出する。周波数応答関数は入力の一フーリエスペクトルと出力の一フーリエスペクトルの比で表される。本研究ではハン

マーでの加振力測定及び録音からシンバルの周波数応答関数を求め、出力であるスティックでの打撃における音圧レベルからスティックによる加振力を算出する。この計算によって得られた結果をスティックでの加振力として数値解析で使用する。

d) 数値計算と実験比較

図 14 に実験結果を、図 15 に数値解析結果を示す。図 14 から全体のグラフ傾向において顕著な差が見られることが確認出来る。スティックによる加振では高周波数帯域音を発生することが可能だが、ハンマーでは発生させることが出来ないことが分かる。図 15 より音圧レベルは異なるが、スティックによる加振では高周波数帯域を豊富に発生させ、ハンマーでは 4000Hz 以下の周波数帯域の音圧レベルが高くなるのが数値解析でも再現されていることが分かる。この結果、数値計算の精度が確認され、加振力の変化が音圧の発生に与える影響を調査することが可能であることが示された。

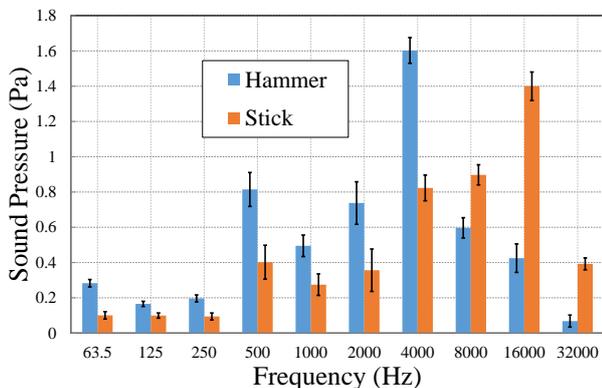


Fig.14 Comparison result of experiment

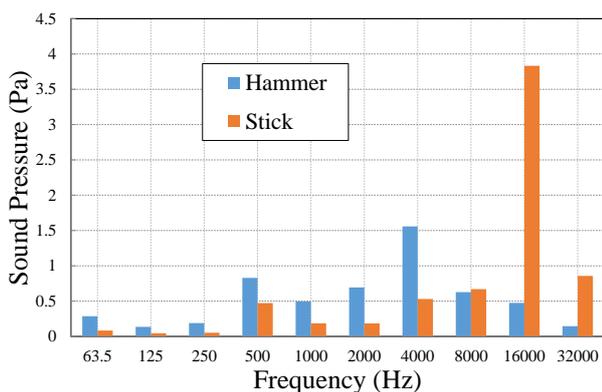


Fig.15 Comparison result of numerical calculation

4. 官能評価試験

録音・解析結果だけでは聴衆者がどのように感じたかを知ることが出来ない。そこで聴衆者がどのように評価するか明確にするため官能評価試験を行う。そして、得られた官能評価結果と録音・解析結果との関連性を探る。

(1) 試験方法

2つのシンバルを叩き、一方のシンバルに対し、もう一方のシンバルがどう感じたかを評価語と尺度に基づき評価を行う。試験では打撃位置、加振力、試聴距離は全て統一し、試験時間は評価者がシンバル音の評価が出来るまでとした。音には美的、迫力、金属性の3次元があることから、評価語は評価しやすい形容詞を各次元に対して2つずつ選択した。本研究では美的には綺麗—汚い、明るい—暗い、迫力には豊かな—貧弱な、迫力のある—ものたりない、金属性には甲高い—落ち着いた、はっきりした—ぼんやりした、この6つを選定した。評価尺度値に関しては、「どちらでもない」を原点にし、それぞれ「やや」「かなり」の5段階のカテゴリーで評価した。評価者は学生8人(男性6名、女性2名)で行った。

(2) 解析方法

a) 概要

解析方法はシンバル音には絶対的な基礎となるものがないため、相対評価であるシェッフェの対比較法を試みる。シェッフェの対比較法は評価対象間に有意な差があるかどうかを検定する方法である。シェッフェの対比較法には幾つかの変法がある。本研究では各評価者が全てのシンバルの組み合わせの対比較評価を一人で行い、評価者がシンバルを叩く順序関係なく評価することから解析方法として「中屋の変法」[6][7]を選定した。

b) シェッフェの対比較法「中屋の変法」の概要

まず、平均評価値を求め、それを心理尺度上の各評価対象の評価点とする。この平均評価値はその評価語に対してどのくらいどう感じたかを数値で示している。次に評価対象間のどこに有意差があるか判断するために信頼区間を求める。この求めた信頼区間の2つの値が+と-にまたがり、その区間に0を含むとその差は有意ではなく、信頼区間に0を含まなければその差は有意であると判断する。

(3) 評価語毎の解析結果

上記の試験・解析方法から、選定した6つの評価語毎の結果うち顕著に結果の出た2つの評価語の結果を示す。

a) 明るい—暗い

図 16 に平均評価値グラフ、表 7 に信頼区間表を示す。図 16 の凡例は左からシンバルのカップ形状要素、加工方法要素、使用材質要素、板厚要素となっている。図 16 から板厚要素はあまり明るさ—暗さの差を感じられていない。表 7 よりカップ形状要素、板厚要素、要素は+と-またがっており有意性をみるが出来なかった。しかし、材質要素は信頼区間に0を含まないため99%信頼区間で有意性がみられた。材質要素がこの評価語への影響度が高い。また、この評価語は6つの評価語の中で最も評価者が評価しやすい結果となった。

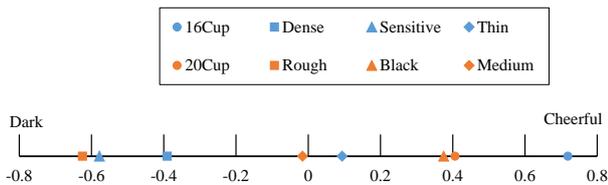


Fig.16 Average rating graph (cheerful-dark)

Table 7 Confidence interval (cheerful-dark)

	99% 区間	
	0.581	-0.581
16Cup-20Cup	0.893	-0.268
Dense - Rough	-0.346	0.815
Sensitive-Black	-1.53	-0.456
Thin - Medium	-0.471	0.690

b) 甲高い—落ち着いた

図 17 に平均評価値グラフ，表 8 に信頼区間表を示す。図 17 から，使用材質要素，加工方法要素，カップ形状要素，板厚要素の順で差が見られた。使用材質要素は片側にそれぞれ大きく寄っており，最もこの評価語に影響を与えている。また，板厚要素は原点に寄っていることから，あまり差を感じることが出来なかった。表 8 より，使用材質要素のみ 99%信頼区間で有意性が見られた。

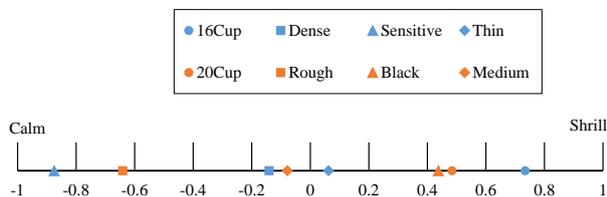


Fig.17 Average rating graph (calm-shrill)

Table 8 Confidence interval (calm-shrill)

	99% 区間	
	0.599	-0.599
16Cup-20Cup	0.849	-0.349
Dense - Rough	-0.0995	1.09
Sensitive-Black	-1.91	-0.800
Thin - Medium	-0.458	0.740

(4) シンバル構成要素ごとの解析結果

評価語毎では有意性があまり見られなかった。そこで構成要素ごとに影響度の強さを調べる。信頼区間を示したグラフの例を図 18 に示す。この信頼区間が何%重なっているのかを各構成要素，各評価語で求めた。この重複部分が少ない程，評価語に対する有意性が高い，つまり影響度が大きいと言える。

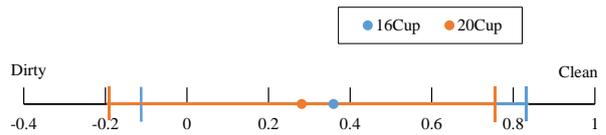


Fig.18 Average rating values and confidence intervals

Table 9 Overlapping degree of confidence interval

	16Cup-20Cup	Dense-Rough	Sensitive-Black	Thin-Medium
綺麗-汚い	91%	98%	75%	77%
明るい-暗い	69%	76%	-3%	89%
豊かな-貧弱な	88%	95%	80%	94%
迫力のある-ものたりない	98%	78%	83%	71%
甲高い-落ち着いた	76%	51%	-28%	76%
はっきりした-ぼんやりした	76%	82%	-2%	97%

表 9 にシンバル構成要素ごとの解析結果を示す。最も重複が少ない評価語を赤字で示している。この結果，各シンバル構成要素が最も影響を与える評価語は，カップ形状要素は「明るい—暗い」，加工方法要素は「甲高い—落ち着いた」，使用材質要素も「甲高い—落ち着いた」，板厚要素は「迫力のある—ものたりない」と推測された。また，全体的にみると使用材質は構成要素の中で最も評価語への影響が大きいと思われる。

(5) 録音解析結果と官能評価試験との比較

各周波数帯域における発生音と官能評価結果との関連性を探るために，評価試験で有意性が見られた 2 つのシンバルの録音解析結果を示す。

a) 明るい—暗い

図 19 に評価試験で最も差が表れた 2 つのシンバルのオクターブバンド分析結果を示す。

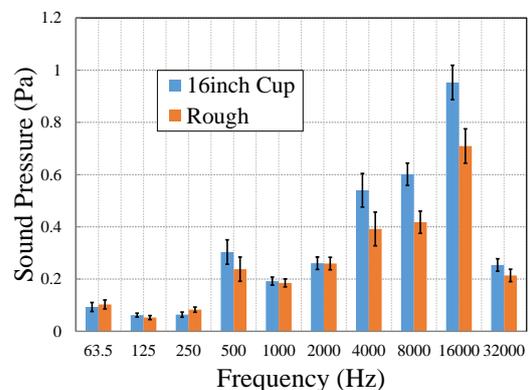


Fig.19 Octave band sound pressure (cheerful-dark)

図 19 より，中心周波数 8000Hz，16000Hz で顕著に差が現れている．評価試験結果では 16inch Cup が Rough に対して強く明るい印象を受けていることから 8000Hz，16000Hz の音圧レベルが顕著に高いと明るい印象を与えると推測される．

b) 甲高いー落ち着いた

図 20 に評価試験で最も差が表れた 2 つのオクターブバンド分析結果を示す．図 20 より 2000Hz では Sensitive が高く音圧が発生し，8000，16000Hz では 16inch Cup の音圧が高く発生する逆転現象が見られた．評価試験では Sensitive は落ち着いた印象を受け，16inch Cup は甲高い印象となっている．このことから 2000Hz の周波数帯域の音圧が落ち着いた印象に影響を与え，8000，16000Hz の高音域の音圧が甲高い印象を受けると推測される．

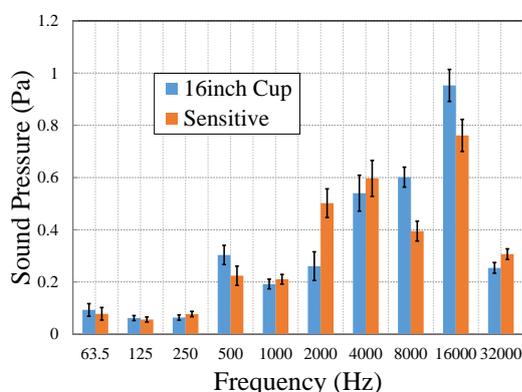


Fig.20 Octave band sound pressure (calm-shrill)

5. 結論

まず，本研究はシンバルの製品開発に繋がる音質向上を目的としてシンバル構成要素毎での録音解析，数値解析，官能評価を行った．以下に得られた知見を列記する．

(1) 録音・解析

a) シンバルのカップ形状

カップ長さを長くすることで中心周波数 1000，2000Hz の音圧が高く発生させ，短くすると 16000，32000Hz の高音域の音圧を高く発生すると判明した．

b) 加工方法

ハンマリングを強めることで全帯域の音圧レベルを高め，特に中心周波数 125，1000，16000Hz で音圧が高く発生すると判明した．

c) 使用材質

Ti を含有することで中心周波数 2000，4000Hz の音圧を高く発生させ，P を含有することで 8000，16000Hz の音圧を高く発生すると判明した．

d) シンバルの板厚

板厚を薄くすることで中心周波数 500，2000，4000，の音圧を高く発生させ，厚くすると 8000，16000Hz の高音域の音圧を高く発生すると判明した．

(2) 数値解析

- 有限要素法と速度ポテンシャルを求めることでシンバルの発生音を予測する数値計算法を開発した．
- 加振力が変化したことによって音圧発生に与える影響について数値計算での予測が可能となった．

(3) 官能評価試験

- シンバル構成要素毎の録音解析結果では音圧差異は確認されたが，明確な差異でなければ聴衆者は知覚することが出来ないと判明した．
- 4000，8000，16000Hz の音圧レベルが高く発生していると美的次元に影響を与え，8000，16000Hz の高音域の音圧レベルが高いと金属性次元は「甲高い」・「はっきりとした」印象を受けると推測された．
- 2000，4000Hz の音圧レベルが顕著に高いと迫力次元に影響を与え，金属性次元は「落ち着いた」・「ぼんやりした」印象を受けると思われる．

謝辞

本研究を遂行するにあたり，担当教授の御法川学教授，専任講師の相原建人先生，兼任講師の岩原光男先生には終始懇切丁寧にご指導頂いた．ここに深謝の意を表す．また，シンバルの付与を始め，研究にご協力くださった株式会社小出製作所の小出俊雄氏には心から感謝申し上げる．

参考文献

- 1) Tsuji K, Kobayashi A, Ishiwata T, Iwahara M, Minorikawa G and Nagamatsu A, “Research for the improvement of cymbal sound quality”, JSME annual meeting, vol.5, 125-126(2003) in Japanese
- 2) M. Ducceschi, C. Touzé. “Modal approach for nonlinear vibrations of damped impacted plates: application to sound synthesis of gongs and cymbals”, Journal of Sound and Vibrations, Vol. 344:313-331(2015)
- 3) Oohashi T, Nishina E, Honda M, Yonekura Y, Fuwamoto Y, Kawai N, Maekawa T, Nakamura S, Fukuyama H and Shibasaki H, “Inaudible high-frequency sounds affect brain activity: hypersonic effect”, Journal of Neurophysiology, vol. 83: 3548-3558 (2000)
- 4) Yagi R, Nishina E, Honda M and Oohashi T, “Modulatory effect of inaudible high-frequency sounds on human acoustic perception”, Neuroscience Letter, vol. 351: 191-195 (2003)
- 5) Iwahara M, Kubota Y, Kubota K and Nagamatsu A “Accuracy Improvement of FEM Model for Impact Sound Prediction of Golf Clubs”, Japan Society of Sports Industry vol.23, No.1 1-10 (2013) in Japanese
- 6) 高木 英行:使える!統計検定・機械学習—Ⅲ—主観評価実験のための有意差検定; システム/制御/情報, Vol 58, No.12, pp.514-520, (2014)
- 7) 佐藤 信:統計的検査法, 日科技連出版社(1985)