

基音への高調波の混合比による音変化

篠田 亮 田村 宜之 石川 智治 宮原 誠

北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科
〒923-1292 石川県能美郡辰口町旭台 1-1,
Tel:0761-51-1234,Fax:0761-51-1380

E-mail: r-shino@jaist.ac.jp y-tamura@jaist.ac.jp ishikawa@jaist.ac.jp miya@jaist.ac.jp

あらまし 我々は、実験的に従来オーディオでは中心的評価語でなかった“深々さ”、“音の重心の低さ”、“抜け”等に注目し、高度感性情報の伝達のための問題の解明に挑戦している。その研究の中で、スピーカーの低音に生じる高調波の量により、上記音質が大きく変化することに気づいた。そこで、本報告は、信号上で高調波の量や位相を変化させ、音質：“音の重心の低さ”等を評価した。その結果、基本波に対する第二、三高調波の量的（位相）比率により、明確に音質：“音の重心の低さ”等が変化することを評価実験で明らかにできたので報告する。

キーワード 高度感性情報, 高調波, 深々さ, 音の重心の低さ, 抜け

Sound change caused by the mixture ratio of 2nd and 3rd harmonics

Ryo SHINODA Yoshiyuki TAMURA Tomoharu ISHIKAWA Makoto Miyahara

School of Information Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology
Asahidai 1-1, Tatsunokuchi, Ishikawa 923-1292, Japan, Tel: 0761-51-1234, Fax: 0761-51-1380

E-mail: r-shino@jaist.ac.jp y-tamura@jaist.ac.jp ishikawa@jaist.ac.jp miya@jaist.ac.jp

Abstract Although the audio system have been advanced, the sound quality of those systems are far from the level of sound quality at the live performance. To resolve the problem, we have introduced High Order Sensation (HOS) that is evoked from music, and we aim to reproduce HOS on the audio system. We have focused to the harmonics distortion of the low-pitched sound playback of the speaker and observed the sound quality (“Deepness”, “Lowness centroid”, “Open”) change by the ratio and phase change of harmonics. The clear sound quality change is observed.

Key words High Order Sensation, Harmonics, Deepness, Lowness centroid, Open

1. まえがき

我々は、名演が持つ高度感性情報を高忠実に伝達して、聴者に深い感動をもたらすことを目的にしている。再生は無歪みであるべきであるが、従来理論ではつかめないレベルの僅かな歪みによって、音質、ひいては、もたらされる感動が激減してしまう。特に重要なのは、従来、オーディオの中では、中心的評価語ではなかった、“深々さ”、“音の重心の低さ”、“音の吐き出し”、“抜け”、である。

この評価語による評価を中心に音響装置を改善しようとしても、従来理論は何も教えてくれない。我々は実験的に、新たなこれら問題を明らかにしてきた。これによると、従来理論上の問題は高度なレベルでクリアしたうえで、(信じられなかったことであるが)スピーカーの点支持を数分の1ミリ、シャーシーの組み立てネジのしめる強さ、入出力コネクタ端子のシャーシーへの取り付けの強さ、コード類の末端の処理、整合性、が大きく関係することが明らかになった。

この研究を進めるため、我々は「シャーシーの振動が伝達される音響信号にどのような影響を与えるか」や、「スピーカボックスの支持によって、波面までが変るのか」、の検討が重要になってきた。この研究は容易には行かない。

そこで、考える方向を転じ、特にスピーカーの低音再生について、低音は高調波歪みが多いので、この量や位相を基本波と比較測定することによって、音質：“音の重心の低さ”、“抜け”、との関連がえられないかと考えた。それにより、高調波から音質：“音の重心の低さ”との関連への手がかりができるからである。

さて、そのためにはじめた実験であるが、上記の長い研究の道のりの入り口で、興味深い発見と、大きな成果が得られたので、報告する。

それは基本波に対して、第二高調波、第三高調波、の量的(位相)比率により、明確に、“音の重心の低さ”、“抜け”、が変わることである。この応用として、上記の長い研究の道りに行く前の、副産物的成果として、電子音楽などの音の作り方などに应用できると考えるので、これを報告する。

2. スピーカーの低音再生と高調波歪み

スピーカーの低音再生に於いては高調波歪みが多く、予備実験により、第二高調波、第三高調波が音質、特に“音の重心の低さ”に影響を与え

ているようなので、低域の正弦波を入力し、その時スピーカーから出力される信号(周波数スペクトル)を観察した。

2-1. 高調波歪みの測定

- ・ 低域の正弦波を入力し、スピーカーの周波数スペクトルを測定
- ・ ポート手前2cmにマイクを設置
- ・ ポート内に鉄棒を設置する、しない場合(Ver1-A, Ver1-B)を比較

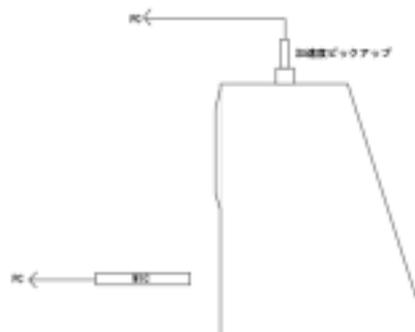


図 1-1. 音響信号の測定方法

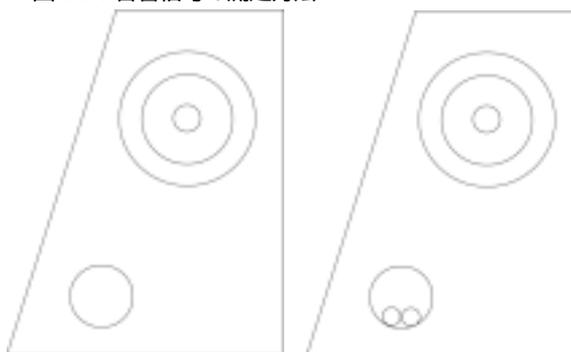


図 1-2. Ver1-A

図 1-3. Ver1-B

2-2. 実験結果と考察

入力した信号(60Hz)に対するスピーカーの出力された周波数スペクトルを以下に示す。



図 A. Ver1-B の周波数スペクトル



図 B. Ver1-A の周波数スペクトル

図 A と図 B の音質比較をした場合、図 A の場合(Ver1-B:ポート内に鉄棒を設置)の方が“音の重心の低さ”で+評価を得た。“音の重心の低さ”

が良い場合の周波数スペクトルは、
基本周波数:3dB 増加,第二高調波:12dB 減少,偶
数次高調波成分はほぼ変わらず,奇数次高調波成
分の減少が観測された.高調波歪みを抑えた方が,
“音の重心の低さ”が改善される事が観察された.
ポート内に鉄棒を置くことにより,開口面積の変
化によるポート内部の空気の流速の変化,防震効
果などが考えられる.

3. 高調波の比率と位相変化による音質変化

次に,基本波に対して,第二高調波,第三高調
波の量的(位相)比率を変化させた信号を作成,
比較評価実験を行い,音質:“音の重心の低さ”,
“抜け”との相関を調べた.

この報告は,再生装置はできるだけ理想的なも
の(ヘッドホン型,20Hz-20000Hz f 特 flat 型)
を用意し,ハードウェアは全く変えない(スピー
カーの支持など一切変えない)で,基本波に対
して高調波の混合比を変えて,即ち,信号処理の
みで,音質(音の重心の低さ,抜け)を変化させ
評価した実験結果を報告する(スピーカーの物理
的要因・特性を変化させて混合比を変えたのは,
他の特性を変えてしまっていることに気づかない
ので,無意味である.)

3-1. 信号構成

評価に用いる複合波は,以下の式で表される.

$$\text{Signal}(t) = a(\sin(2\pi \cdot f \cdot t) + b \times \sin(2\pi \cdot 2f \cdot t + \phi_2) + c \times \sin(2\pi \cdot 3f \cdot t + \phi_3))$$

a: 振幅

b,c: 合成比パラメータ

f: 基本周波数(30,40,50)

t: サンプリング単位時間(1/44.1k)

ϕ_2, ϕ_3 : 位相

本報告では,上式においての b, c, ϕ_2, ϕ_3 がパ
ラメータとなる.

3-2. 複合波作成

3-2-1. 強度変化

基本周波数,第二高調波,第三高調波の強度比
率が“音の重心の低さ”に与える影響を調査す
るために表1に示される信号を作成した.なお
30,40,50Hz を基本周波数とする高調波の組み合
わせで,それぞれ行った.

表1. 強度比率

基本波強度	3	3	3	3
第二高調波強度	3	4	5	6
第三高調波強度	3	2	1	0

代表として以下に 50Hz の波形を示す.

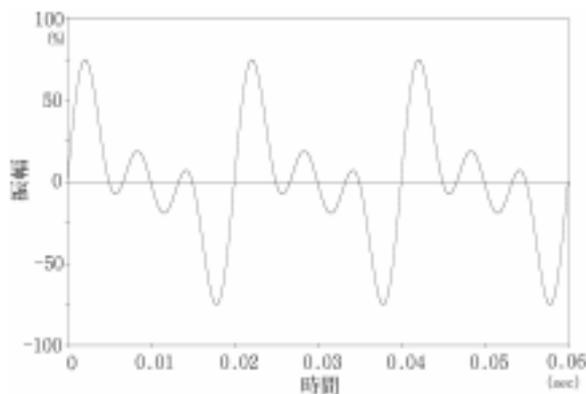


図2-1.強度比率(基本波:第二高調波:第三高調波)3:3:3

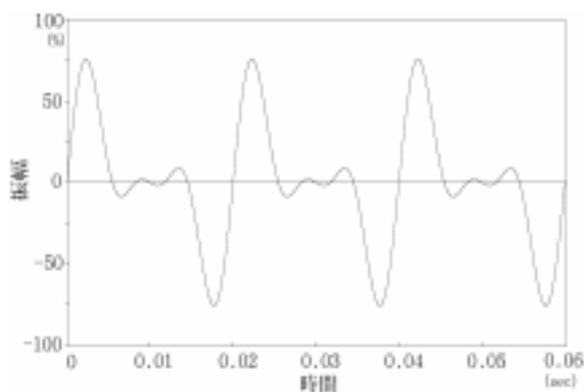


図2-2.強度比率(基本波:第二高調波:第三高調波)3:4:2

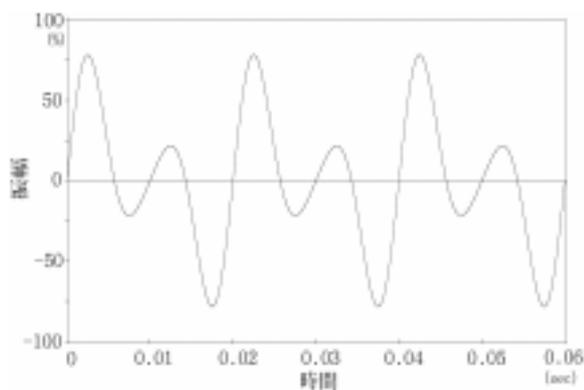


図2-3.強度比率(基本波:第二高調波:第三高調波)3:5:1

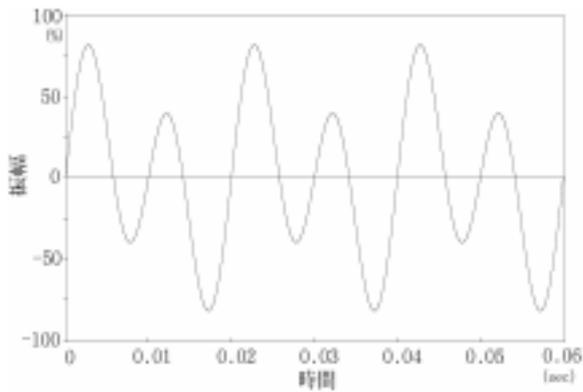


図 2-4.強度比率(基本波：第二高調波：第三高調波)3:6:0

3 - 2 - 2 . 位相変化

第二高調波，第三高調波の位相変化が，“音の重心の低さ”に与える影響を調査するための複合波を作成した。

表 2 . 位相変化の組み合わせ (第二高調波位相)

評価音の表記	0-0-0	0-45-0	0-90-0	0-135-0	0-180-0
基本波位相	0	0	0	0	0
第二高調波位相	0	45	90	135	180
第三高調波位相	0	0	0	0	0

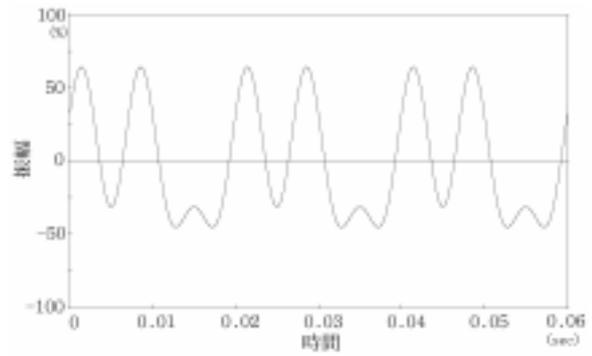


図 3-3.第二高調波の位相変化

(基本波：第二高調波：第三高調波) 0-90-0

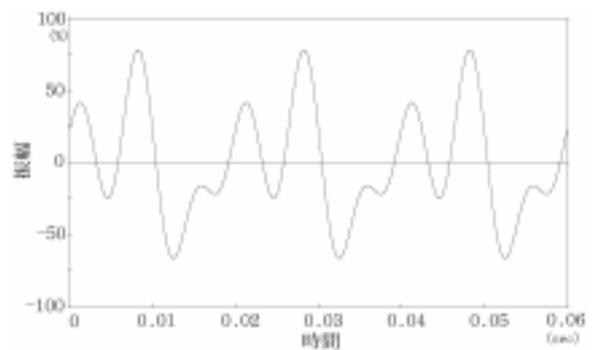


図 3-4.第二高調波の位相変化

(基本波：第二高調波：第三高調波) 0-135-0

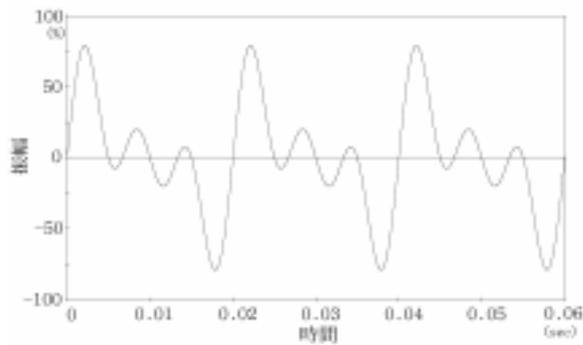


図 3-1.第二高調波の位相変化

(基本波：第二高調波：第三高調波) 0-0-0

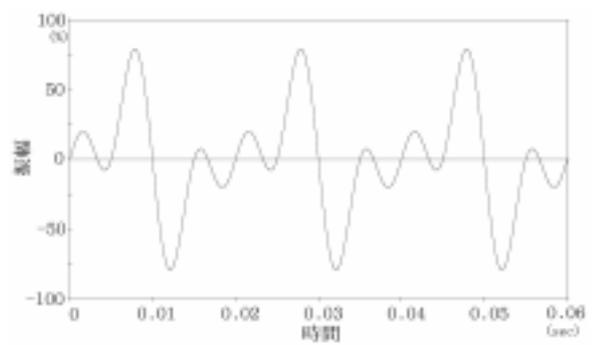


図 3-5.第二高調波の位相変化

(基本波：第二高調波：第三高調波) 0-180-0

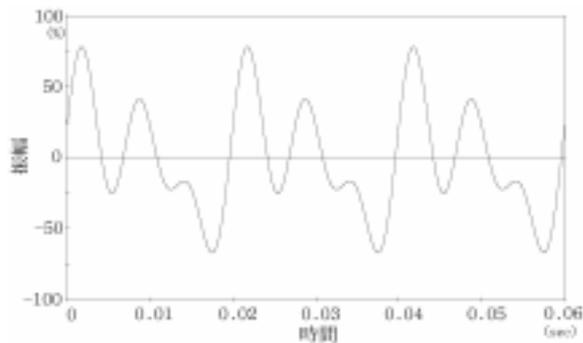


図 3-2.第二高調波の位相変化

(基本波：第二高調波：第三高調波) 0-45-0

表 3 . 位相変化の組み合わせ (第三高調波位相)

評価音の表記	0-0-0	0-0-45	0-0-90	0-0-135	0-0-180
基本波位相	0	0	0	0	0
第二高調波位相	0	0	0	0	0
第三高調波位相	0	45	90	135	180

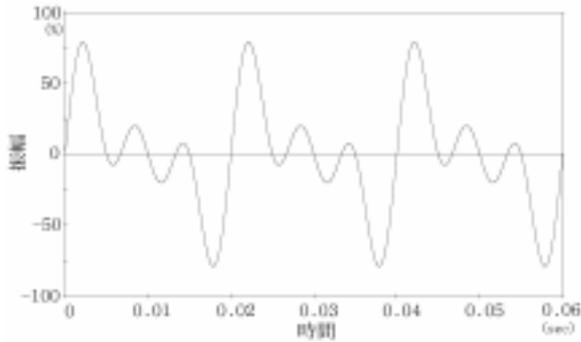


図 4-1. 第三高調波の位相変化
(基本波：第二高調波：第三高調波) 0-0-0

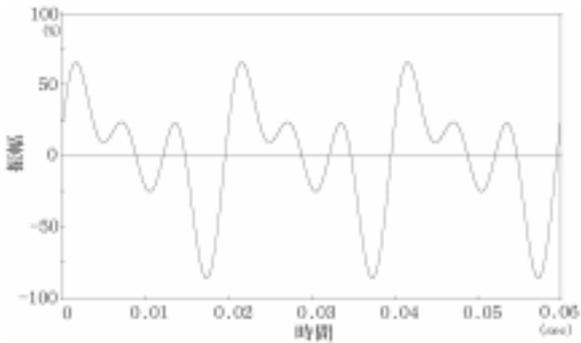


図 4-2. 第三高調波の位相変化
(基本波：第二高調波：第三高調波) 0-0-45

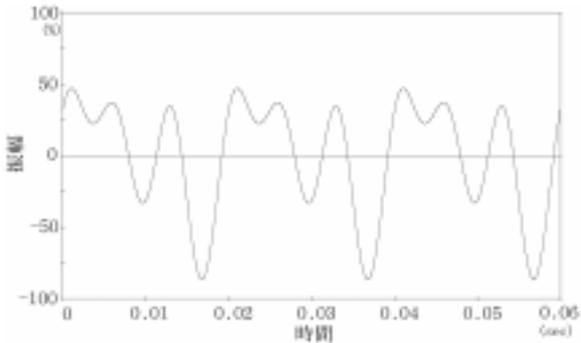


図 4-3. 第三高調波の位相変化
(基本波：第二高調波：第三高調波) 0-0-90

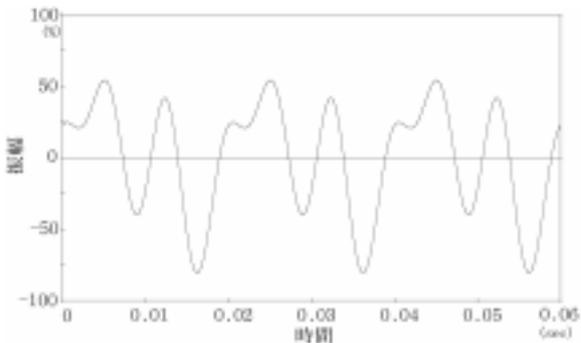


図 4-4. 第三高調波の位相変化
(基本波：第二高調波：第三高調波) 0-0-135

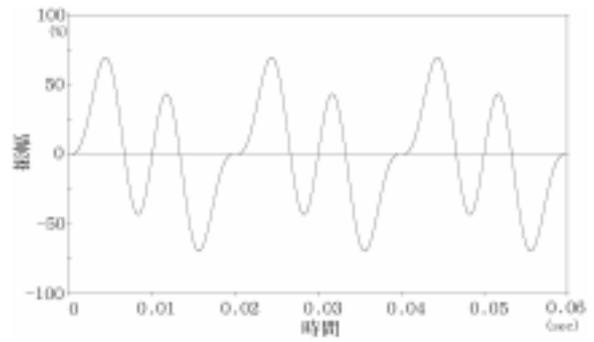


図 4 - 5 . 第三高調波の位相変化
(基本波：第二高調波：第三高調波) 0-0-180

3 - 3 . 評価実験装置

a. ヘッドホン SONY MDR-R10

周波数特性 20-20000Hz

b. 27cm Woofer 開発例(宮原システム)

スピーカーの諸元(Q_0 , m_0 , f_0)及び、使用しているスピーカーシステムを以下に示す.

$Q_0=0.2$, $m_0=58[\text{gr}]$, $f_0=23[\text{Hz}]$

Mid-range: JBL LE85, Horn: Fostex H400

Tweeter: YAMAHA 0506

上記, 27cm Woofer と Mid-range, Tweeter を用いた 3way スピーカーシステムの周波数特性及び電気インピーダンス特性を図5, 図6に示す.

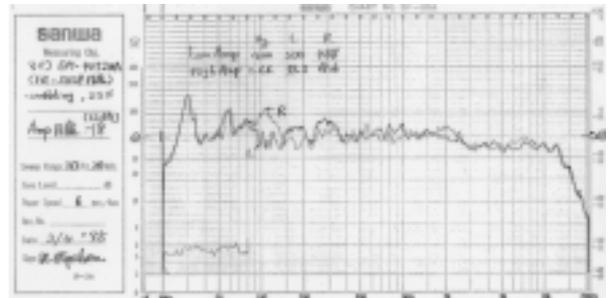


図5. 27cm Woofer を用いたスピーカーシステム周波数特性

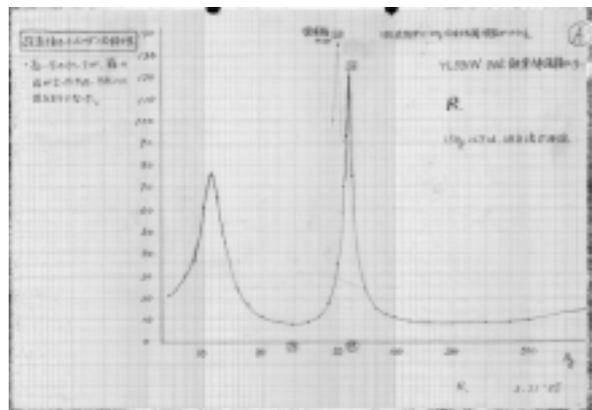


図6. 27cm Woofer を用いたスピーカーシステムのインピーダンス特性(なお, 低周波数帯域の特性補正は, マルチチャンネル)

ネルシステムのLPFに組み込んだ回路により、行っている。)

4. 評価結果 (スピーカー使用)

強度変化の対比較において、「好ましい」と判断された度数の集計をとると以下の通りになる。

4-1. 強度変化を比較した場合の評価結果

表4-1. 集計結果 30Hz

	3:3:3	3:4:2	3:5:1	3:6:0
3:3:3		2	1	2
3:4:2	0		2	0
3:5:1	1	0		1
3:6:0	0	2	1	
計	1	4	4	3

表4-2. 集計結果 40Hz

	3:3:3	3:4:2	3:5:1	3:6:0
3:3:3		1	1	0
3:4:2	1		0	0
3:5:1	1	2		0
3:6:0	2	2	2	
計	4	5	3	0

表4-3. 評価結果 50Hz

	3:3:3	3:4:2	3:5:1	3:6:0
3:3:3		1	0	0
3:4:2	1		1	0
3:5:1	2	1		0
3:6:0	2	2	2	
計	5	4	3	0

また、特性の対についてではあるが、以下のようなコメントを得た。

表5. コメント

対	コメント
30Hz 3:3:3 3:6:0	「重心の低さ」について 3:6:0 のほうが低く感じられる
30Hz 3:4:2 3:6:0	3:4:2 が「ヌケ」に関しては良い
40Hz 3:4:2 3:6:0	3:6:0 「重心の低さ」が感じられる 3:4:2 「うなり」が良い
40Hz 3:5:1 3:3:3	両方良い
40Hz 3:6:0 3:3:3	3:3:3 が「ヌケ」が良く「重心の低さ」がある
50Hz 3:4:2 3:6:0	3:6:0 は全くだめ
50Hz 3:4:2 3:5:1	両方合格
50Hz 3:3:3 3:4:2	両方良い
50Hz 3:4:2 3:5:1	3:4:2 が 30Hz, 40Hz 含めて全ての中で一番良い

4-2. 位相変化

強度変化と同様に、位相変化についても集計をとった結果を以下に示す。

表6-1. 評価結果 (第二高調波の位相変化)

	0-0-0	0-45-0	0-90-0	0-135-0	0-180-0
0-0-0		0	1	0	0
0-45-0	2		1	1	1
0-90-0	1	1		0	1
0-135-0	2	1	2		1
0-180-0	2	1	1	1	
計	7	3	5	2	3

表6-2. 評価結果 (第三高調波の位相変化)

	0-0-0	0-45-0	0-90-0	0-135-0	0-180-0
0-0-0		0	1	0	0
0-45-0	2		1	1	1
0-90-0	1	1		0	1
0-135-0	2	1	2		1
0-180-0	2	1	1	1	
計	7	3	5	2	3

5. ヘッドホンを使用した追加実験

ヘッドホンで「音の重心の低さ」が感じられるかどうかの検証を、スピーカーを使用した評価と同様に行った。

表7-1. 評価結果 30Hz

	3:3:3	3:4:2	3:5:1	3:6:0
3:3:3		1	1	0
3:4:2	1		1	0
3:5:1	1	1		0
3:6:0	1	1	1	
計	3	3	3	0

表7-2. 評価結果 40Hz

	3:3:3	3:4:2	3:5:1	3:6:0
3:3:3		2	2	2
3:4:2	0		0	0
3:5:1	0	2		0
3:6:0	0	2	2	
計	0	6	4	2

表7-3. 評価結果 50Hz

	3:3:3	3:4:2	3:5:1	3:6:0
3:3:3		2	1	0
3:4:2	0		0	0
3:5:1	1	2		0
3:6:0	2	2	2	
計	3	6	3	0

6. 結果と考察

“音の重心の低さ”に関して調査するために始めた実験であったが、実際に複合波の音を聞いてみると、“音の重心の低さ”だけでなく“抜け”“量感”、“うなり”などの多数の音質評価要因があることがわかった。

6-1. 強度変化に関して

基音が30Hzの場合、基本波、第二高調波、第三高調波の強度比率が3:3:3 3:6:0の場合の音質上で比較したコメントより第二高調波の強度が“重心の低さ”において重要なことがわかる。すなわち、

第二高調波が多いと“音の重心が低く”なる。“抜け”の良さに関しては3:4:2 3:6:0の比較コメントより第三高調波の強度が強い方が良いようである。

総合的に“好ましい”と判断された強度比率は3:4:2, 3:5:1であった。但し、この両者の差が僅かである事がわかる。

基音が40Hzの場合、総合音質として3:4:2, 3:3:3が良いと判断された。

基音が50Hzの場合、3:3:3, 3:4:2の評価が高い。これらの“好ましい”の差も僅かである。

6-2. 位相変化に関して

強度比率の評価音に比べ音質差は微小であった。

第二高調波、第三高調波の位相変化においては“音の重心の低さ”よりも“うなり”、“量感”に関しての変化が感じられた。実験結果は、第二高調波の位相変化では0°、つまり位相のズレが無い複合波が最も好ましいという結果を得た。一方、第三高調波の位相変化では評価がばらついてしまい、複合波間の音質差に有意な差は見られないという結果になった。

第二高調波の位相変化では判断が明確に行われ、対して第三高調波の位相変化では判断がばらついてしまった事より、総合的な“好ましい”に関しては第二高調波の位相変化がより影響を与えようと言える。

6-3. ヘッドホンによる実験結果

スピーカーによる実験結果とは一致していない。つまり、スピーカーとヘッドホンでは音の感じ方に違いがあることが明らかになった。それは、

“音の重心の低さ”に関して、ヘッドホンでは感じる事ができなかった。このことにより、“音の重心の低さ”を感じることは、鼓膜から聴いた音だけでなく、体感される音が大きな影響を及ぼしていることが考えられる。

7. まとめ

- ・第二高調波 > 基音 および 第二高調波 > 第三高調波 > 0 となる音が総合的に「好ましい」
- ・“抜け”に関して第三高調波の強度に比例して良くなる
- ・第二高調波の位相のズレは悪影響を与える
- ・総合的な「好ましさ」に関して第三高調波よりも第二高調波の位相変化の方が影響を与える
- ・“音の重心の低さ”はヘッドホンでは感じられず、体感される音が大きな影響を及ぼしていることが考えられる。

[参考文献]

- [1] 宮原誠：“高品位 Audio-Visual System 先端技術インフラの研究”，オーディオビジュアル複合情報処理,13-6, pp.39-46, 1996
- [2] 宮原誠：“高度感性情報（深い感動）を伝達する画像・音システム”，日本学術振興会，学術月報,Vol.54No.4 通巻 677 号, pp.28-29, 2001
- [3] B・J・C・ムーア：“聴覚心理学概論”，誠信書房,1978
- [2] 境久雄：“聴覚と音響心理”，コロナ社,1978
- [3] 勝木保次：“聴覚と音声”，コロナ社,1980
- [4] 大串健吾,中山剛,福田患彦：“画質と音質の評価技術”，昭晃堂,1991
- [5] 難波精一郎,桑野園子：“音の評価のための心理学的測定法”，コロナ社,1998
- [6] 中島平太郎：“ハイファイスピーカー”，日本放送出版協会刊,1968
- [7] 石川智治,冬木真吾,宮原誠：“音質評価語の多次元空間におけるグルーピングと総合音質に重要な評価語”，電子情報通信学会論文誌, Vol.J80-A, No.11, pp.1805-1811, 1997