

音楽再生における非線形歪みがリスナーのストレス状態に与える影響 Influences of Non-Linear Distortion in Music Playback on Listeners' Stress

中田 賢伸[†] 村松 駿[‡] 吉田 孝博[†]
Kenshin Nakada Shun Muramatsu Takahiro Yoshida

1. はじめに

近年、音響機器の性能は向上しており、一般家庭においても高音質な音楽を楽しめる環境が整いつつある。しかし、音響機器に含まれるわずかな非線形性による音質変化により、同一の音源を異なる音響機器で再生した場合や、同一機器でもケーブルや電源環境、動作状態などが異なる状態で再生した場合に、リスナーの楽曲に対する印象が意図せず変化してしまう現象が依然として課題となっている。この現象のメカニズムを解明するため、本研究室ではこれまでに、音響機器のチューニング状態が音楽再生時に生じる高調波歪みや相互変調歪みの特性を変化させることを計測により明らかにした[1][2]。また、非線形歪みを付加した音源を用いた、音や音楽の印象に関する主観評価実験を行ってきた。しかしながら、対象とする音質変化は、音像や音楽の印象の微細で感覚的な変化として知覚される現象であるため、リスナーが実際に変化を感じていても、印象の言語化が難しいことで評価語の解釈が個人で大きく異なり、安定した主観評価が行えなかった。

一方で、人間はストレスを感じると交感神経が優位になり、心拍数が上昇することが報告されている[3]。そこで本研究では、音楽再生における非線形歪みがリスナーに与える印象の変化を、リスナーの生体反応で評価するアプローチを試みた。この生体反応として、今回はパルスオキシメータで計測した脈波から抽出した、人のストレス状態の指標となる脈波間隔の変動を用いた。

本論文では、40名の被験者に対する3種類の楽曲による評価実験の方法と結果を述べる。

2. 評価実験方法

2.1 音源の作成

音響機器の非線形性によって生じる現実的な歪みとして、高調波歪みを考慮する。高調波歪みとは入力信号の周波数の整数倍の成分に生じる歪みであり、次数の偶奇によって偶数次高調波歪みと奇数次高調波歪みに分けられる。一般的に、偶数次高調波歪みには調和しない不快な周波数成分だけでなく、心地の良い響きとされるオクターブの関係[4]の周波数成分も含まれているのに対し、奇数次高調波歪みは調和しない周波数成分が多く含まれている。この違いを比較するため、偶奇2種類の高調波歪みを用意した。具体的には、 n 次高調波が多項式近似式の n 乗項を用いて表現できる[5]ことを利用し、2種類の非線形特性モデルを作成した。1つ目は偶数乗項のみで構成された多項式近似で、単一周波数の正弦波を入力した場合に偶数次高調波歪みが

発生するモデルであり、次式で表される。なお、 X は入力信号の振幅、 Y は歪んだ出力信号の振幅である。

$$Y = X - 1.005X^2 + 5.210X^4 - 11.542X^6 + 11.348X^8 - 4.083X^{10} \quad (1)$$

2つ目は奇数乗項のみで構成された多項式近似で、単一周波数の正弦波を入力した場合に奇数次高調波歪みが発生するモデルであり、次式で表される。

$$Y = 1.356X - 3.723X^3 + 15.028X^5 - 28.249X^7 + 24.738X^9 - 8.166X^{11} \quad (2)$$

評価実験において、歪みによるストレス状態の変化を現れやすくするとともに、実験時に用いる再生機器の歪みが、歪みモデルによる歪みに比べて十分小さくなるようにするため、今回の歪みモデルは全高調波歪み率 (THD) を 2.69% に設定した。歪みモデルの入出力特性を図 1 に示す。

また、評価に用いる楽曲の選定も重要である。特に、楽曲に元々含まれる倍音成分は、音の印象に強く影響を与えると考えられる。そこで今回は、表 1 に示す、倍音成分の異なる3つの楽曲を用いる。

楽曲①は複数楽器で構成され、最も多くの倍音成分が含まれている。楽曲②は単一楽器のみで構成され、アコースティックピアノの倍音成分のみが含まれている。楽曲③は正弦波のみで構成され、倍音成分が全く含まれていない。なお、今回はいずれの楽曲も和音で構成されているため、歪みモデルにより、高調波歪みとともに相互変調歪みも付加されている。

評価実験では、以上のとおり、3種類の歪みの付加状態 (歪み付加無し、偶数次高調波歪みを付加、奇数次高調波歪みを付加) を3種類の楽曲に適用することで、計9種類の音源を作成し、使用した。

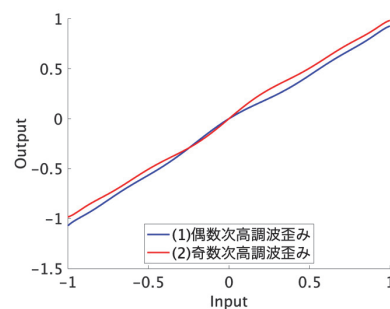


図 1 歪みモデルの入出力特性

表 1 使用した楽曲の種類と詳細

	①ルパン三世のテーマ	② Summer	③ 蛍の光
構成	複数楽器	ピアノ	正弦波
テンポ (BPM)	♩ = 138	♩ = 90	♩ = 105
サンプリングレート	44.1 kHz	44.1 kHz	96 kHz
量子化分解能	16 bit	16 bit	32 bit
使用区間	冒頭 28 秒	冒頭 32 秒	18 秒

[†] Tokyo University of Science

[‡] The University of Tokyo

2.2 実験方法

実験環境と装置の概略図を図 2 に示す。評価実験では、wav 音源を、ノート PC に USB 接続の DAC (NuForce UDH-100) を介して接続したヘッドフォン (SONY MDR-CD900ST) を被験者 (正常な聴覚感度を持つ健康な男女 40 名) に装着して再生する。被験者は、防音室にて等身サイズのソファに身を委ねてリラックスさせた状態で聴取する。開始前に、音楽を再生しながら被験者に明瞭に聴き取れる音量へ調整してもらい、耳を音に慣れさせた。被験者には、実験内容や再生する音源の内容・順序を一切伝えない状態で、各曲について歪み付加無し音源 (以下 W/O と記す)、偶数次高調波歪み付加音源 (以下 EVEN と記す)、奇数次高調波歪み付加音源 (以下 ODD と記す) の順で、それぞれ 3 秒の無音区間を挟んで 2 回ずつ聴取させた。

2.3 評価方法

評価に用いる脈波間隔の変動は、被験者の非利き手の人差し指にパルスオキシメータ (Texas Instruments AFE4490SPO2EVM) を装着して脈波を測定し、得られた脈波から信号処理により抽出することで得る。計測された脈波の例を図 3 に示す。図 3 中、赤矢印で示した区間が脈波間隔であり、この時間変化が脈波間隔の変動である。各測定において、各音源の再生開始直前の 3 秒間、および再生終了直後の 3 秒間の平均脈波間隔を抽出した。この間隔が再生前と比べて再生後の方が狭まった場合にはストレス状態に変化したとし、反対に間隔が広まった場合には、リラックス状態に変化したとみなす。

3. 評価実験結果と考察

評価結果として、楽曲と歪みの種類による脈波間隔の変動を図 4 に示す。同じ楽曲であっても歪みの付加状態によって被験者のストレス状態の変化に差があること、同じ歪

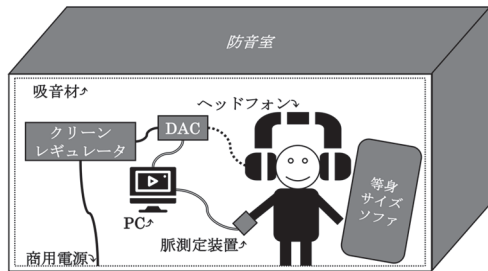


図 2 実験環境と装置の概略図

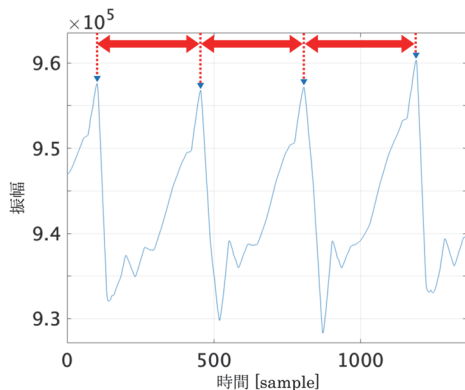


図 3 脈波波形と脈波間隔

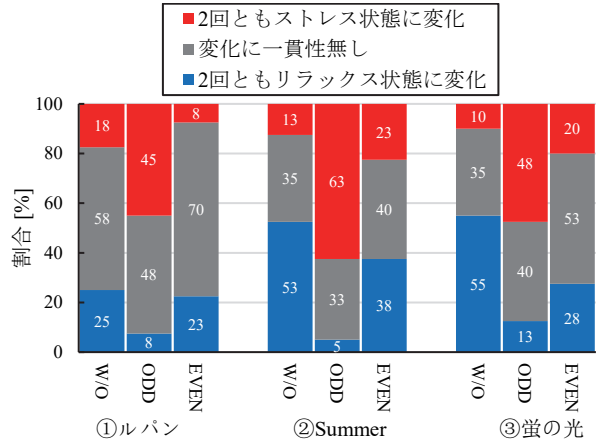


図 4 楽曲・歪みの種類による脈波間隔変動

みの付加状態であっても楽曲によってストレス状態の変化に差があることが読み取れる。

奇数次高調波歪みでは、楽曲によらず半数前後 (45~63%) の被験者がストレス状態へ変化した。一方、偶数次高調波歪みではストレス状態へ変化した割合は 8~23% と少ない。これは、2.1 節で述べたように、偶数次と比べて奇数次高調波歪みには調和しない周波数成分がより多く含まれていることが一因と考えられる。以上より、音楽再生における非線形歪みがリスナーに影響を及ぼしていることが生体反応からも確認できたと言える。

なお、原音に含まれる倍音成分が少ない「Summer」と全く含まれない「蛍の光」については、歪みを付加しない場合に最もストレスを誘発しないという自然な結果だったのに対し、原音に倍音成分が多く含む「ルパン三世のテーマ」については無付加よりも偶数次高調波歪みを加えた方がストレスを誘発しないという結果となった。この原因は不明であるが、アップテンポな曲調によって、高調波歪みによる音色変化に対する印象が異なってくる可能性も考えられる。

4. まとめ

本研究では、音響機器の非線形性によって音源に付加される歪みがリスナーに及ぼす影響について、リスナーの脈波間隔の変動からストレス状態を測定することで評価した。

その結果、歪みが付加された音源の方がストレス状態になりやすく、特に、奇数次高調波歪みが付加されたものについてその傾向が明確に存在した。このように、本研究により、音楽再生における非線形歪みが、リスナーに影響を及ぼしていることが生体反応から確認できた。

参考文献

- [1] T. Fujino and T. Yoshida, "Audio Signal Deterioration Caused by Propagation Noise between Audio Equipment (2nd report)," J. Phys.: Conf. Ser. 1075, p. 012012, 2018.
- [2] D. Kobayashi, T. Kuwabara, and T. Yoshida, "The influence of non-audible high frequency noise on the playback sound of audio equipment," Proc. of 2017 IEEE 6th GCCE, 2017.
- [3] N. Charkoudian and J. A. Rabbitts, "Sympathetic neural mechanisms in human cardiovascular health and disease," Mayo Clin. Proc. 84, pp.822-830, 2009.
- [4] T. Borra, H. Versnel, C. Kemner, A. J. Van Opstal, and R. Van Ee, "Octave effect in auditory attention," Proc. Natl Acad. Sci. USA 110, pp.15225-15230, 2013.
- [5] L. W. Lee and E. R. Geddes, "Auditory perception of nonlinear distortion," Audio Eng. Soc., Convention 115, Paper 5891, 2003.