

Swept-Sine 信号を用いたスピーカの動的歪み測定法

ビフステック(株)

佐々木 徹、高田 寛太郎、中島 平太郎

1. はじめに

従来、スピーカの歪み測定は無響室で正弦波信号を加えたときの高調波歪みや混変調歪みを計測していた。これらの測定値と試聴結果との間に相関が低い事例も多く、また試聴時には定常的な正弦波信号ではなく音楽や音声信号を用いることを背景に、二階堂らは動的歪測定法を提案した[1]。これは狭帯域成分を消去した広帯域信号音を被測定系に加え、消去帯域内に生ずる歪み成分を計測するものである。

その後、今岡・大賀は試験音として Pink-TSP 信号を用い、インパルス応答を利用して小型スピーカの動的歪みの測定法を提案している[2][3]。

本研究では、これらの研究を参考に、スピーカの動的歪みの主因となる帯域を特定できる測定法について検討した結果、試聴試験との対応も考慮し、小音量で十分な歪み検出感度をもつ試験音を見出した。その適用例としてスピーカ・キャビネット形状による動的歪みの違いを観測した。

2. 動的歪測定法

従来の動的歪測定法の原理を図 1 に示す。試験音として二階堂[1]は番組音または広帯域雑音を、今岡ら[2]は Pink-TSP 信号を用いた。それらの一部狭帯域成分を消去して被測定系に加え、当該狭帯域内に生じた歪成分を帯域通過フィルタで取り出し測定するものである。

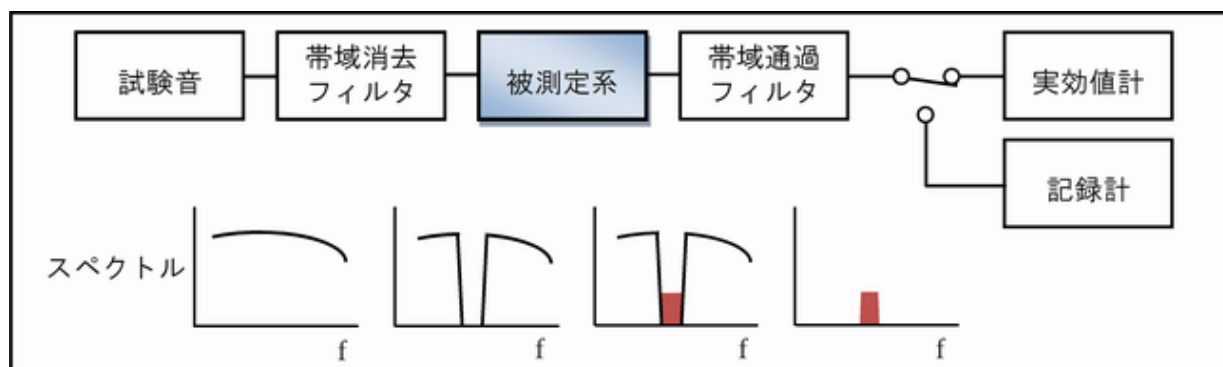


図 1 動的歪測定法の原理図 [1]

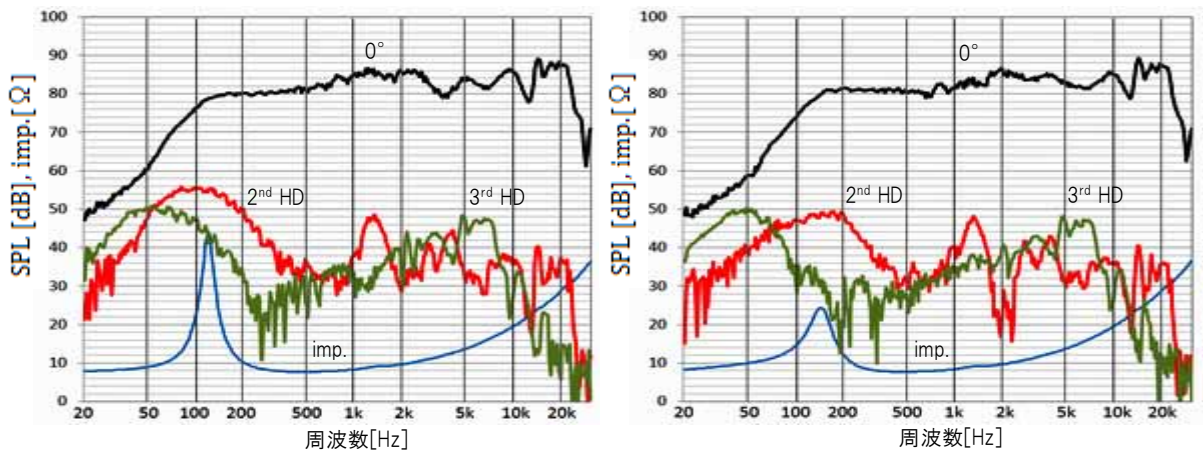
3. 被測定スピーカ

今回の実験では、口径 8cm、公称インピーダンス 8Ω のフルレンジ・スピーカユニット(Tang Band W3-593SG)を使用した。このユニットを箱型キャビネットと卵型キャビネット(写真1)に交互にマウントして測定する。無響室にて入力 1W、距離 1m で測定した周波数特性を図 2 に示す。



(a) 箱型キャビネット (b) 卵型キャビネット

写真1 供試スピーカ外観



(a) 箱型キャビネット

(b) 卵型キャビネット

図2 供試スピーカ周波数特性

4. 測定用試験信号

スピーカ測定用試験音として TSP (Swept-Sine)信号、Pink-TSP (log-Swept-Sine)信号、flat-log-Swept-Sine (以下、flat-LSS)信号を使用した。

TSP 信号は次式のスペクトルを IDFT して得る。

$$H(n) = \begin{cases} \alpha_0 \exp(-j4\pi m n^2 / N^2) & 0 \leq n \leq N/2 \\ H^*(N-n) & N/2 < n < N \end{cases} \quad (1)$$

Pink-TSP 信号は次式のスペクトルを IDFT して得る。

$$H(n) = \begin{cases} 1 & n = 0 \\ \exp(-jan \log(n)) / \sqrt{n} & 0 < n \leq N/2 \\ H^*(N-n) & N/2 < n < N \end{cases} \quad (2)$$

flat-LSS 信号は次式のスペクトルを IDFT して得る。

$$H(n) = \begin{cases} 1 & n = 0 \\ \exp(-jan \log(n)) & 0 < n \leq N/2 \\ H^*(N-n) & N/2 < n < N \end{cases} \quad (3)$$

ただし、(2),(3)式で $a(N/2)\log(N/2) = 2\pi m$ (m は整数)である。

これらの試験音の波形を図3に示す。

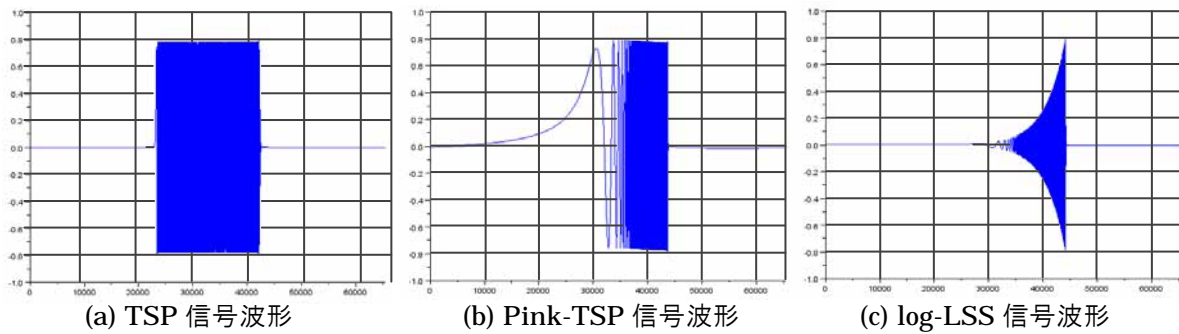


図3 測定用試験信号の波形

各信号を定義する(1)~(3)式中の整数 m は信号の幅を決定するパラメータで、例えばTSP信号の中央部の幅は $2 \times m$ で表される。この m を増減することにより実質的に掃引速度が反比例して変化する。

このとき各波形の実効値が \sqrt{m} に比例して変化するの、これを加味して音圧換算する必要がある。

TSP信号($N=65536, m=19200$)を基準として各信号スペクトルの相対レベルを図4に示す。TSPとflat-LSSでは $m=19200 \mid 13576 \mid 9600 \mid 6788$ 、Pink-TSPでは $m=16000 \mid 11314 \mid 8000 \mid 5657$ と $1/\sqrt{2}$ 倍ずつ小さくしている。flat-LSS信号はTSP信号に比べ実効値が10dB低いことがわかる。

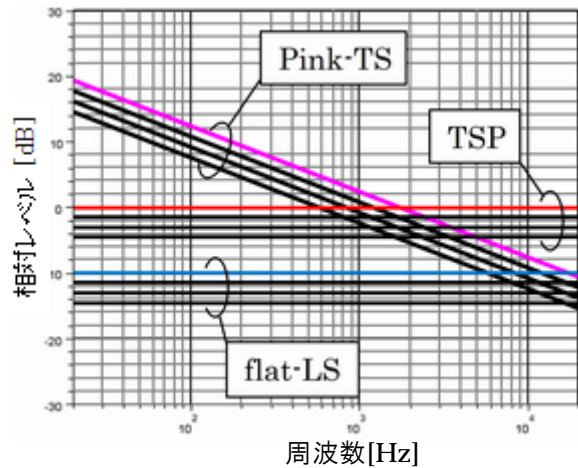


図4 各試験信号の相対スペクトル強度

各信号に対する帯域消去は(1)~(3)式の当該帯域のスペクトルをゼロとして波形生成した。

動的歪みの観測は、実験室(内寸 $W2.7m \times D4.5m \times H2.55m$)で行った。環境騒音の影響を減少させるため、これらの試験信号を32回繰り返し再生し、同期加算して応答波形を求めた。また、反射波の影響を減じるため、スピーカと測定マイクロフォンの間隔を15cmとしている。

5. 動的歪み測定結果

5.1. 従来の動的歪み測定結果

比較のため、図1の測定原理図に基づいて供試スピーカの動的歪みを観測してみる。紙面の都合上、flat-LSS信号による測定結果のみを図5に示す。

図5は、中心周波数を200~10kHzの間で1/3oct.間隔で設定し、消去帯域幅を1/2oct.、歪み検出のための通過帯域幅を1/3oct.として観測した結果である。各図とも上から0.24W | 0.06W入力時の音圧出力特性、0.24W | 0.06W入力時の動的歪み特性、そして暗騒音レベルをプロットしたものである。

これらの動的歪み特性から、キャビネット形状による違いは低音域で僅かに見られるものの、その歪みの由来などについては知ることはできなかった。

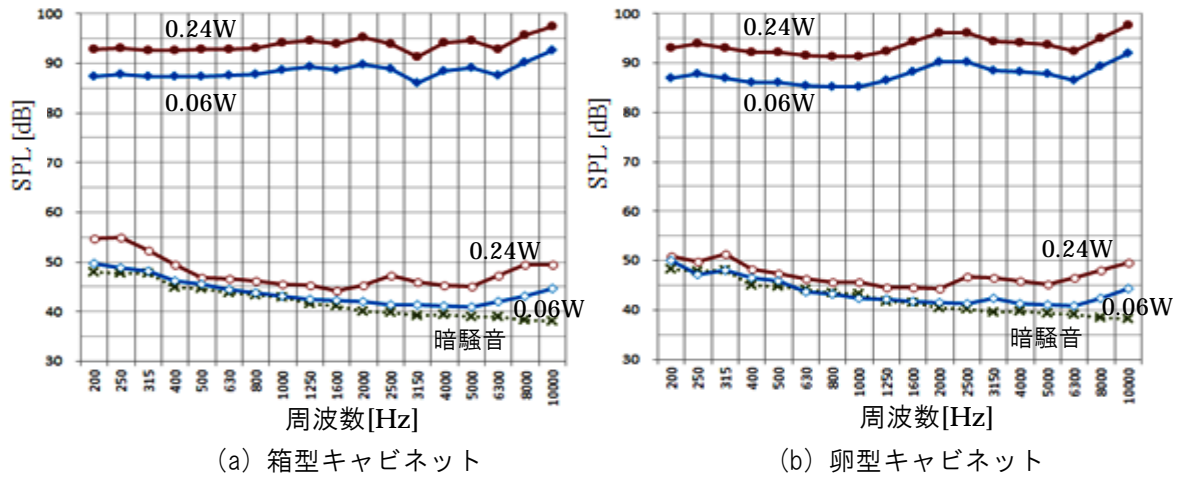


図5 従来の動的歪み測定結果

5.2. 提案する動的歪み測定法と測定例

従来法では信号成分を消去した狭帯域内に生ずる歪みを検出していたが、提案法では歪みの主因を探るために帯域を二分して低域側と高域側をそれぞれ消去した信号を作成し、信号成分を消去した帯域に現れた歪み成分を観測する(図6)。

分割する周波数は任意だが、今回は供試スピーカユニットの口径、指向特性や分割振動帯域と動的歪みとの関連を示唆する結果が得られるか試行するため、 $ka=0.3 \mid 1 \mid 3$ (波定数 $k = 2\pi f/c$ 、 a :半径)となる周波数 $f_c=520 \mid 1745 \mid 5200\text{Hz}$ を選択した。

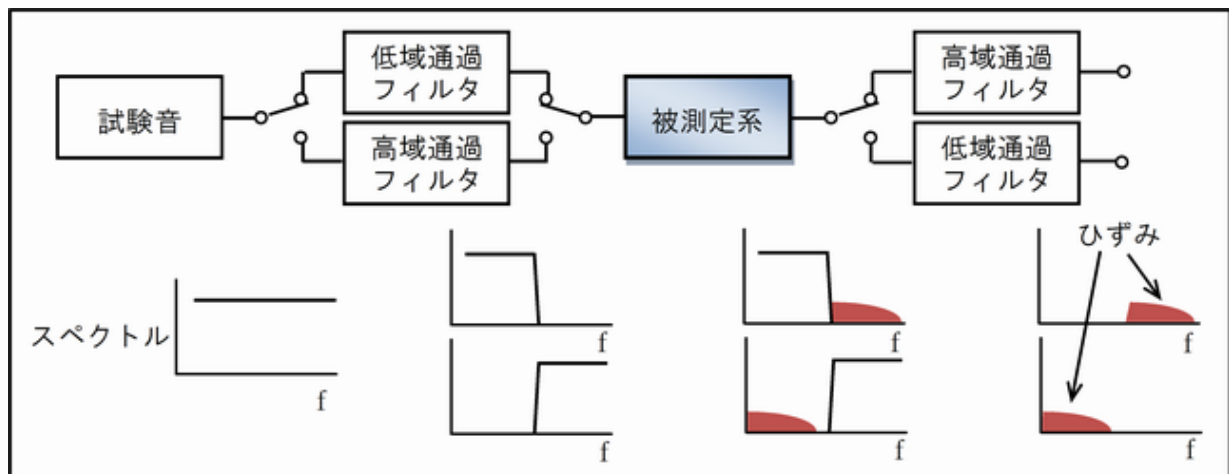


図6 提案する動的歪測定法の原理図

帯域消去した flat-LSS 信号を箱型キャビネットのスピーカに加えたときの応答スペクトルを図7に、卵型キャビネットのスピーカの場合を図8に示す。

これらを見ると、低域通過信号に対し遮断周波数以上の帯域に高調波歪みと考えられる歪みが現れ(各図の左側)、高域通過信号に対し遮断周波数以下の帯域、特に200Hz以下に歪みが現れている(各図の右側)。

供試スピーカの場合、前者の歪みについてはキャビネット形状による違いはほとんど見られないが、後者の歪みについては卵型キャビネットのスピーカのほうが約 5dB 低い結果となっている。

また、後者の歪みは遮断周波数にほぼ係わらずに現れている。3 つの高域通過信号の共通成分は 5.2kHz 以上の帯域にあるので、この歪みの主因はこの帯域での非線形動作にあることが示唆される。

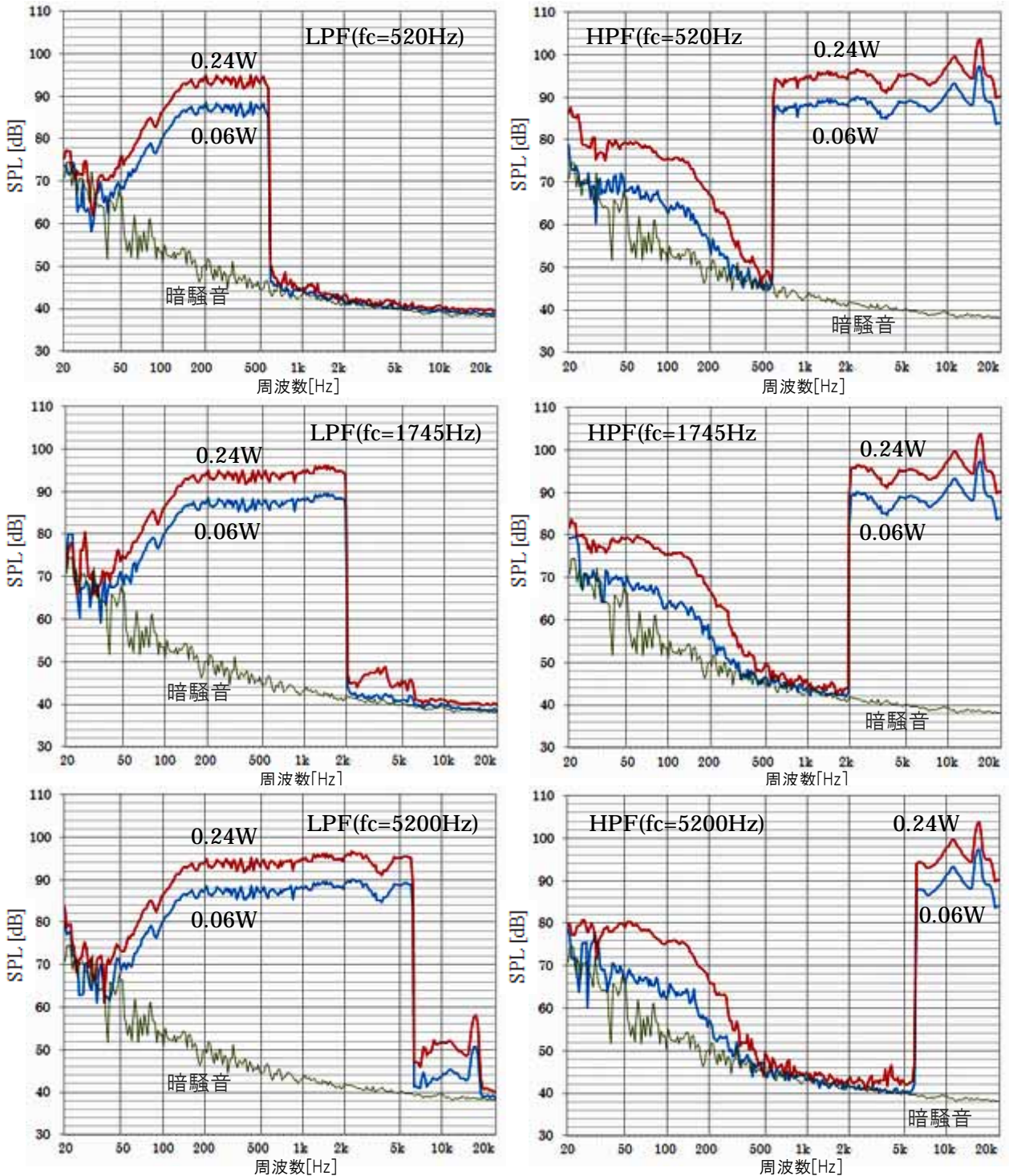


図7 帯域消去 flat-LSS 応答スペクトル (箱型キャビネット)

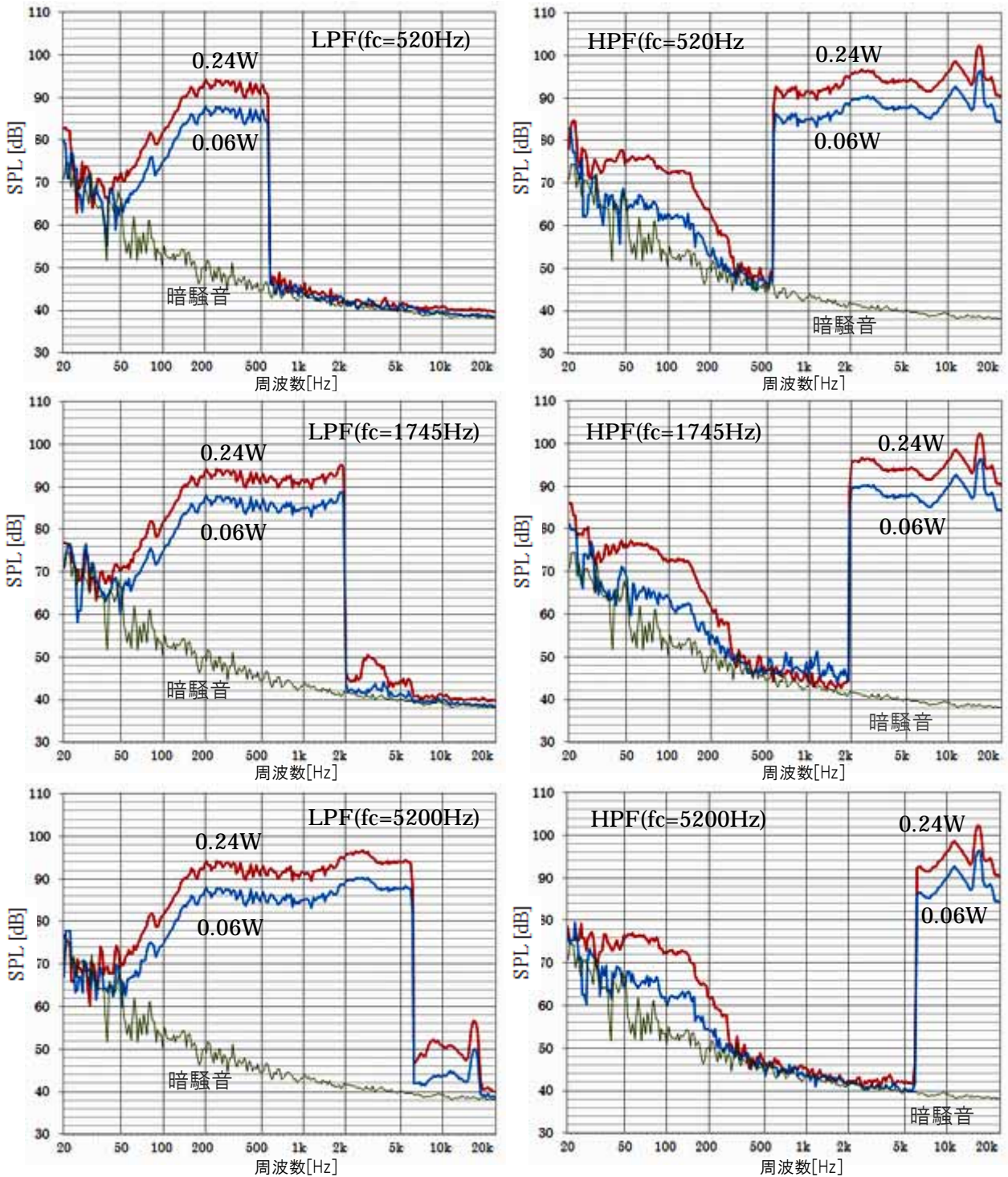
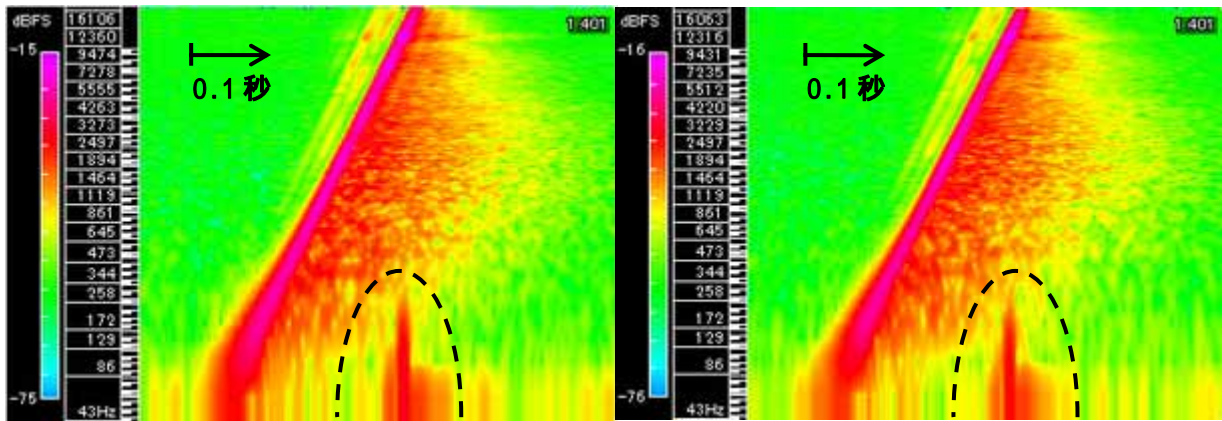


図 8 帯域消去 flat-LSS 応答スペクトル (卵型キャビネット)

確認のため、帯域消去しない flat-LSS 信号に対する応答スペクトログラムを観測した。図 9(a),(b)とも低域から高域に向けて (図の左から右に向けて) 掃引されたが、信号が高音域に達した時点で低域に歪み (図中の破線領域) が現れていることが確認できる。



(a) 箱型キャビネットのスピーカ

(b) 卵型キャビネットのスピーカ

図9 flat-LSS 応答スペクトログラム

なお、flat-LSS 信号の幅パラメータ m を増減して掃引速度を変化させると、図 10 のように歪みの出現帯域が変化することも実験から分かった。

6. 考察

今回の実験で得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 狭帯域消去信号に対し当該狭帯域成分を検出する従来の手法よりも、帯域通過信号に対し遮断域に現れる歪み成分を検出する提案手法がその歪みの由来を特定しやすい。
- (2) 提案する flat-LSS 信号はその振幅スペクトルレベルが低いにも関わらず十分な検出感度をもつ。
- (3) 低域通過 flat-LSS 信号に対し高域側に現れる歪みは高調波歪みであると考えられ、信号の掃引速度には影響されない。一方、高域通過 flat-LSS 信号に対し低域側に現れる歪み成分は高音域ピークに対応して現れ、歪みの出現帯域は掃引速度に依存する。
- (4) キャビネット形状として箱型と卵型を比較すると、卵型キャビネットのスピーカのほうがこれらの歪みが低いことがわかった。

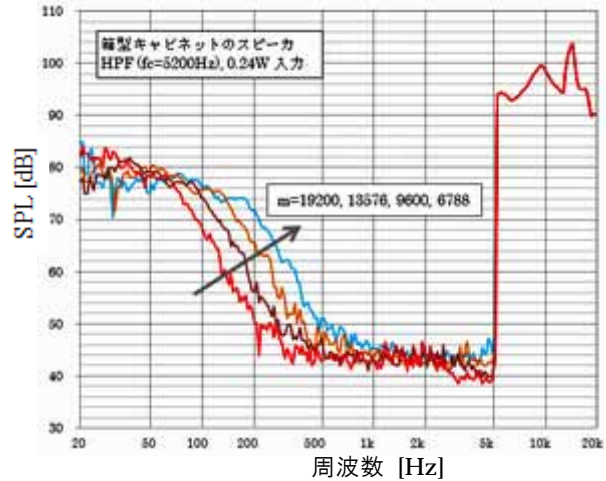


図10 幅パラメータ m によるスペクトル変化

7. おわりに

帯域消去 flat-LSS 信号による動的歪み検出法について提案したが、歪み発生の詳細な仕組みや試聴結果との関連について今後検討していきたいと考えている。

また、この手法をスピーカのみならず音響機器全般に適用し、その音質改善に有効か検討していきたい。

謝 辞

本研究を進めるにあたりご助言いただいた弊社社長 井橋孝夫氏、並びに無響室の利用でご協力いただいたソニー(株)、フォスター電機(株)に深く感謝致します。

文 献

- [1] 二階堂誠也, 市川満, 中村秀夫, “音声伝送系における非直線ひずみの検知ならびに測定法”, NHK 技術研究 vol.27, No.2, Ser. No.145 (1975) 別刷 pp.1-34.
- [2] 今岡啓一, 大賀寿郎, “音響機器の動的歪のデジタル測定法”, 日本音響学会講演論文集, pp.567-568 (2004.9).
- [3] 今岡啓一, 大賀寿郎, “小型スピーカにおける動的歪と高調波歪の関係とその解析”, 日本音響学会誌 65 巻 1 号 (2009), pp.15-22.
- [4] Carsten Thomsen and Henning Moller, Swept measurements of harmonic, difference frequency and intermodulation distortion, Bruel & Kjaer application notes 日本語版, pp.1-15, 1978.
- [5] 小谷野進司, “高音用スピーカの歪み発生要因の検討”, PIONEER R&D, vol.13, No.2, pp.63-68, 2003.

執筆者プロフィール



中島 平太郎

1921 年生まれ。1944 年 東京工業大学卒。1947 年 九州大学大学院修了。
日本放送協会、SONY などを経て 2006 年よりビフレストック(株)会長。
音響技術研究、CD などデジタル録音再生技術の研究開発。
1993 年 4 月に CD の開発に対して紫綬褒章受章。



高田 寛太郎

1948 年生まれ。1972 年 東京工業大学卒。同年 SONY 入社。
音響・振動解析、マイクロフォン、ヘッドフォン、スピーカ、業務用オーディオ機器の研究開発。2008 年よりビフレストック(株)。
趣味はドライブと水泳。



佐々木 徹

1952 年生まれ。1974 年 千葉大学 電気工学部卒業。同年 SONY 入社。
マイクロフォン、ANC など音響信号処理の研究開発、及び知的財産業務。
2010 年よりビフレストック(株)。
PC 指導のボランティア活動にも従事。