

大音圧で測定したインパルス応答による室内音響特性算出の検討

竹林 涼[†] 金田 豊[‡]

[†] 東京電機大学工学部 〒120-8551 東京都足立区千住旭町 5

E-mail: [†] 16kmc17@ms.dendai.ac.jp, [‡] kaneda@c.dendai.ac.jp

あらまし インパルス応答を測定する際、大音圧で測定することで環境雑音の影響を小さくし、SN比を向上することが可能である。しかし、大音圧で測定するとスピーカなどに非線形歪が発生するという問題がある。そこで本研究では、測定機器の定格を超え、非線形歪が発生するような大音圧でインパルス応答を測定した場合の、歪の影響を確認した。非線形歪としては高調波歪と基本波歪が発生するが、Log-SS などの高調波歪を分離できる測定信号を利用すれば、各種の室内音響特性をほぼ正確に算出できることがわかった。また、大音圧測定において発生するその他の非線形歪や起こり得る問題についても検討した。

キーワード インパルス応答、高調波歪、大音圧、掃引正弦波信号、スピーカ

Study of room acoustic characteristics calculation from an impulse response measured at high sound pressure

Ryo TAKEBAYASHI[†] Yutaka KANEDA[‡]

[†] Graduate school of Engineering, Tokyo Denki University,

5 Senju-asahi-cho, Adachi-ku, Tokyo, 120-8551 Japan

E-mail: [†] 16kmc17@ms.dendai.ac.jp, [‡] kaneda@c.dendai.ac.jp

Abstract When measuring an impulse response, it is possible to reduce the effect of ambient noise by measuring at a high sound pressure. However, the nonlinear distortion of a loudspeaker occurs during measurement at a high sound pressure. In this study, we first measured the nonlinear distortion of an impulse response at a high sound pressure that exceeded the rating of the measuring equipment. Harmonic distortion and fundamental wave distortion were observed as nonlinear distortion. However, we showed that it is possible to calculate room acoustic characteristics while avoiding the effect of distortion by using a signal, such as Log-SS, that can separate harmonic distortion. We also examined the possible problems occurring in measurement at a high sound pressure.

Keywords impulse response, harmonic distortion, high sound pressure, swept sine signal, loudspeaker

1. はじめに

室内インパルス応答はさまざまな室内音響特性量を導出することができる重要な特性量である。したがって、その測定を高いSN比で行うことは大変重要である。しかし音響インパルス信号は一般にエネルギーが小さく十分なSN比が得られないため、インパルス応答の測定にはTSP信号[1]やM系列信号[2]などのエネルギーの大きなインパルス応答測定信号が利用されてきた。

また、より高いSN比を得るために、測定信号長を長くして信号のエネルギーを上昇させたり、適切なスペクトルを持った信号[3][4]の利用が試みられてきた。しかし、最も簡単なSN比向上方法は、測定信号を大音圧(本稿では音響再生機器の定格値付近での再生音圧

を大音圧と定義する)で再生することである。

大音圧再生時の問題点は、スピーカに非線形歪が発生してインパルス応答に測定誤差が発生することである。代表的な非線形歪である高調波歪は掃引正弦波の1つであるLog-SS信号[3]を用いれば分離、除去することは可能である。しかし、大音圧による測定では、高調波歪の他に、インパルス応答本体が変形する歪が発生しており(以降、この歪を「基本波歪」と呼ぶ)、その影響を評価しておくことが必要である。

本報告では、基本波歪を含んだインパルス応答測定結果からさまざまな室内音響特性量を算出して大音圧測定の有用性を検討する。さらに、大音圧測定において発生しうる問題点について検討する。

2. インパルス応答測定原理

図1にインパルス応答の測定系を周波数領域で表現したブロック図を示す。図において $S(k)$ はインパルス応答測定用の信号である。ここで、 k は離散周波数番号を表すが、図では k を省略して表している。また、 $H(k)$ はインパルス応答の等価量である系の周波数特性を表し、 $N(k)$ は環境雑音、 $1/S(k)$ は測定信号の逆特性を表す。測定用信号 $S(k)$ を測定対象とする系に入力すると応答信号 $H(k)S(k)$ が出力される。雑音 $N(k)$ が無い場合、この応答信号 $H(k)S(k)$ に測定信号の逆特性 $1/S(k)$ をもつフィルタをかけることで $H(k)$ を得ることができる。そして、 $H(k)$ を逆フーリエ変換することでインパルス応答が得られる。

しかし現実には環境雑音 $N(k)$ が存在し、 $N(k)/S(k)$ が測定誤差として付加される。この誤差項は $S(k)$ のスペクトルを適切に設定することでも低減することができる[5]が、最も簡単には $S(k)$ 全体を増大する、すなわち大音圧測定で低減することができる。

3. 掃引正弦波の測定結果に含まれる非線形歪

大音圧で測定信号を再生するとスピーカには非線形歪が発生する。入力が掃引正弦波の場合、入力周波数の整数倍の周波数の高調波歪、および入力正弦波の振幅・位相が、系が線形の場合と比べて変形する基本波歪、の2種類の歪が発生する(図2)。

図3にLog-SS信号を用いて測定した結果を示す。高調波歪の影響は、インパルス応答本体とは時間軸上で分離された、パルス状の波形として現れる[3]。この歪は時間軸上で容易に除去できることが理解できる。一方、基本波歪は、図4に示すようにインパルス応答本体の変形(波形全体の振幅縮小と変形)として影響する。

図5にこれらの非線形歪の影響による誤差の大きさを測定した結果[6]を示す。図において横軸は1m地点でのスピーカの再生音圧を表し、縦軸はインパルス応答のエネルギーで正規化した非線形誤差のエネルギーを表す。□印は2次高調波歪による誤差、△印は3次高調波歪による誤差を表しており(ただし、65dB以下は雑音による影響で上昇)、音圧95dBで約-35dBとなっている。一方、○印は基本波歪による誤差で、最大約-13dBと、高調波歪と比べて20dB以上も大きい誤差となっている。

この基本波歪は入力周波数と同じ周波数の振幅低下であるので聴覚的には影響は小さいため、従来は高調波歪に比べて無視されることも多かった。しかし、基本波歪は高調波歪のように分離、除去することはできず、インパルス応答本体に大きな誤差量として含ま

れるため、室内音響特性算出に及ぼす影響を評価しておく必要がある。

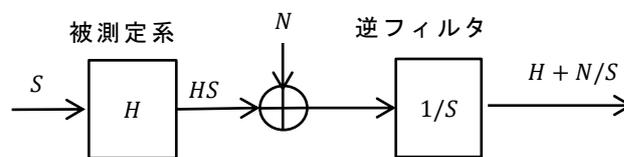


図1 インパルス応答の測定

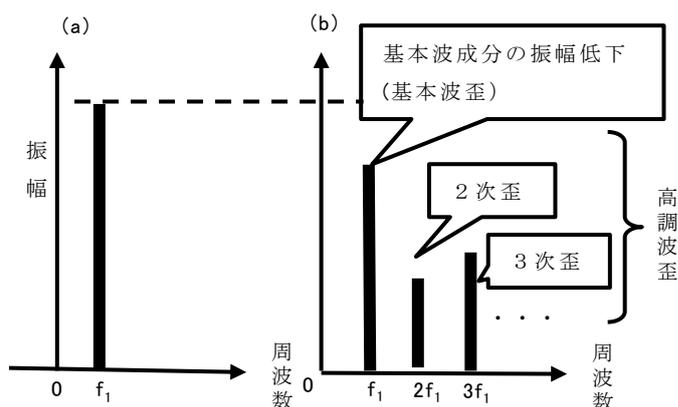


図2 周波数 f_1 の正弦波に対する系の出力信号スペクトル

(a)系が線形の場合 (b)系が非線形の場合

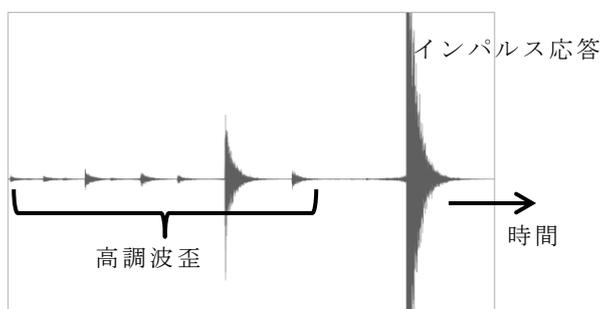


図3 大音圧のLog-SS信号で測定したインパルス応答

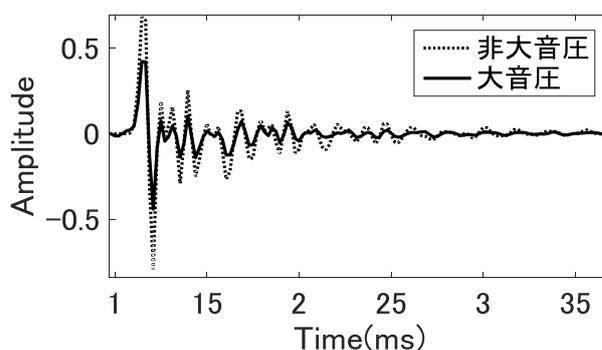


図4 大音圧測定時のスピーカのインパルス応答波形の変形

4. 対象とする室内音響特性

本報告では以下の室内音響特性を対象とした。ただし $h(t)$ はインパルス応答を表す

- ① 残響時間 T_{30} [s]: 次式の残響曲線 $r(\tau)$ の -5~-35dB の傾きから求める 60dB 減衰するのに要する時間

$$r(\tau) = \int_{\tau}^{\infty} h^2(t) dt / \int_0^{\infty} h^2(t) dt$$

- ② $C80 = 10 \log \left(\int_0^{80ms} h^2(t) dt / \int_{80ms}^{\infty} h^2(t) dt \right)$ [dB]

- ③ $D50 = \int_0^{50ms} h^2(t) dt / \int_0^{\infty} h^2(t) dt$

- ④ $T_s = \int_0^{\infty} t \times h^2(t) dt / \int_0^{\infty} h^2(t) dt$ [s]
(時間重心)

- ⑤ EDT[s]: 残響曲線の 0dB から -10dB の傾きから求める残響時間

- ⑥ $MTF : m(F) = \left| \int_0^{\infty} h^2(t) e^{-j2\pi Ft} dt \right| / \int_0^{\infty} h^2(t) dt$

5. 大音圧での室内音響特性の測定

5.1. 残響曲線とインパルス応答開始点の測定

前章で示した室内音響特性を算出するには、それら定義式に含まれる、残響曲線 $r(\tau)$ の計算およびインパルス応答の開始点(定義式において $t=0$ とする点。以下、「開始点」と呼ぶ)の検出の正確性が重要だと考えられる。よって、実際に室内音響特性を算出する前に、大音圧による測定がこれらの量に与える影響を検討した。

測定条件を表 1 に示す。測定点はスピーカマイク間距離を 3 種類に変更した 3 箇所で行った。この条件下、大音圧 (1m 地点の音圧 110dB) と非大音圧 (1m 地点の音圧 70dB) でインパルス応答を測定した。そして、測定されたインパルス応答から求めたオクターブバンドの残響曲線を図 6 に示す。

図より、どの周波数帯域においても実線で書かれた非大音圧の測定結果と破線で書かれた大音圧の測定結果がほぼ一致している (図の白黒印刷では重なって区別がつかない) ことがわかる。この結果は測定点 C での結果であるが、他の測定点でも同様の結果が得られた。このことから、大音圧でインパルス応答を測定することによって起きるインパルス応答の変形は残響曲線を求める際には影響を及ぼさないことがわかる。

次に、インパルス応答の開始点を検出した。本報告では、図 7 に示すように、インパルス応答の時間前方からインパルス応答方向を見て、最初に振幅の絶対値が最大値から -20dB の値となった点を開始点とした[7]。

3 つの測定点で、非大音圧および大音圧で測定したインパルス応答に対して検出した開始点を、表 2 に示

す。単位はサンプル(1/48 ms)である。どの測定点の結果も開始点はほぼ一致している。大音圧測定では基本波歪の影響でインパルス応答は変形するが、図 4 のように、インパルス応答先頭部分はほぼ比例的に振幅が減少していることが、開始点に影響を与えない要因と考えられる。このように大音圧でインパルス応答を測定しても、開始点は正しく検出できることがわかった。

5.2. 室内音響特性の測定

以上より、大音圧で測定することによってインパルス応答が非線形歪の影響で劣化していても、室内音響特性を求める際に重要である残響曲線の計算およびインパルス応答の開始点の検出はほぼ正しく行えることがわかった。よって、室内音響特性も正しく算出できると考えられる。

まず、図 6 の残響曲線が一致していることから、残響曲線に関しては大音圧でも正しく測定できることがわかる、また、測定点 C における $C80$ 、 $D50$ 、 T_s 、EDT、MTF をインパルス応答から算出した結果を図 8 に示した。また、大音圧測定時と非大音圧測定時の誤差、および各特性量の JND(聴覚の検知限)を表 3 に示した。大音圧と非大音圧での結果はほぼ一致しており、その誤差は JND の範囲内にも収まっている。その他の測定点でも同様の結果が得られた。

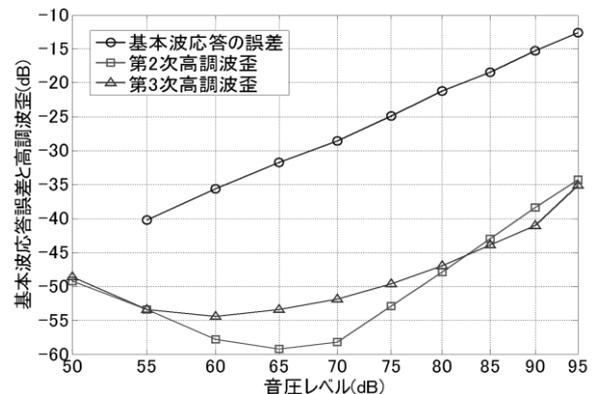


図 5 再生音圧と基本波歪および高調波歪の関係

表 1 測定条件

実験室寸法	9.1 × 6.3 × 2.8 m
サンプリング周波数	48kHz
残響時間	約 1.2 秒
使用スピーカ	BOSE 101MM 口径 11.5cm フルレンジスピーカ
使用アンプ	B&K Type2734
スピーカマイク間距離	1m(測定点 A) 2m(測定点 B) 3m(測定点 C)
使用信号	Log-SS 信号

5.3. スピーカの影響の検討

インパルス応答の非線形歪の主要因はスピーカの非線形特性によるものである。そこで、異なるスピーカを用いても大音圧測定の有効性が得られるかどうかを検証した。使用したスピーカは、以下の2つである。

- 1) VICTOR SX-WD30 口径 9cm フルレンジ
- 2) TANNOY SYSTEM600 口径 16.5cm 同軸 2way

大音圧測定時と非大音圧測定時との室内音響特性の誤差を表4、5に示す。表4は VICTOR SX-WD30 の結果、表5は TANNOY SYSTEM600 の結果を示す。これらより、すべての室内音響特性の誤差量は JND の範囲内にも収まっていることがわかる。このように、異なる非線形特性を持つ異なるスピーカを用いた場合でも、同様に大音圧測定の有効性が検証できた。

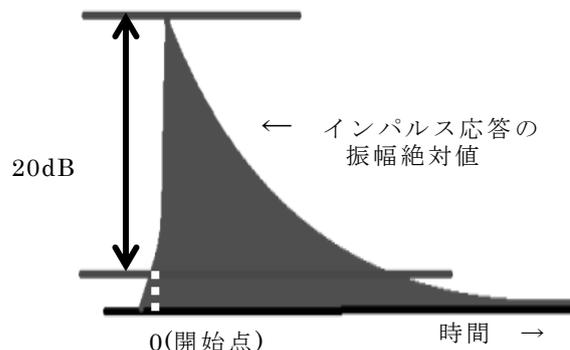


図7 開始点の検出方法

表2 開始点の測定結果

測定音圧	測定点 A	測定点 B	測定点 C
非大音圧	3804	3927	4076
大音圧	3804	3927	4077

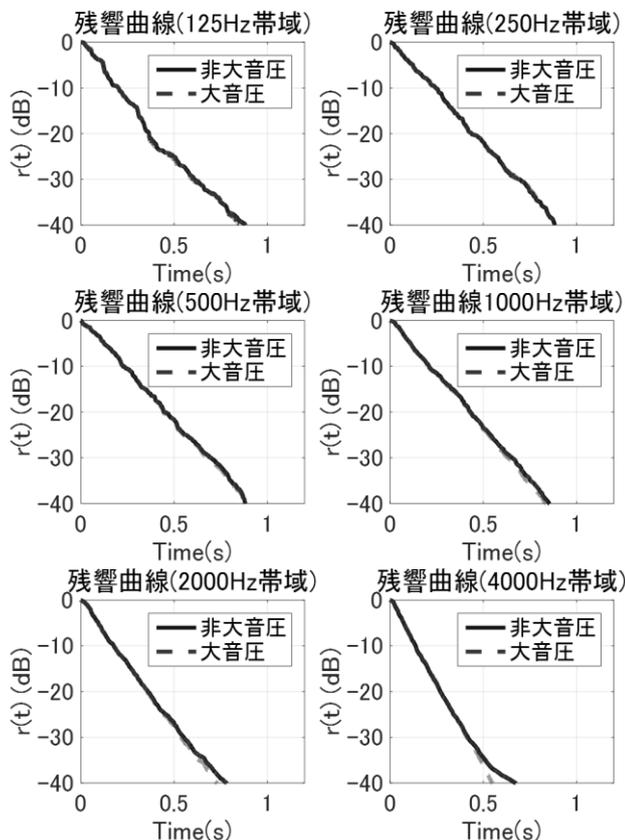


図6 非大音圧と大音圧で求めた
オクターブバンド残響曲線

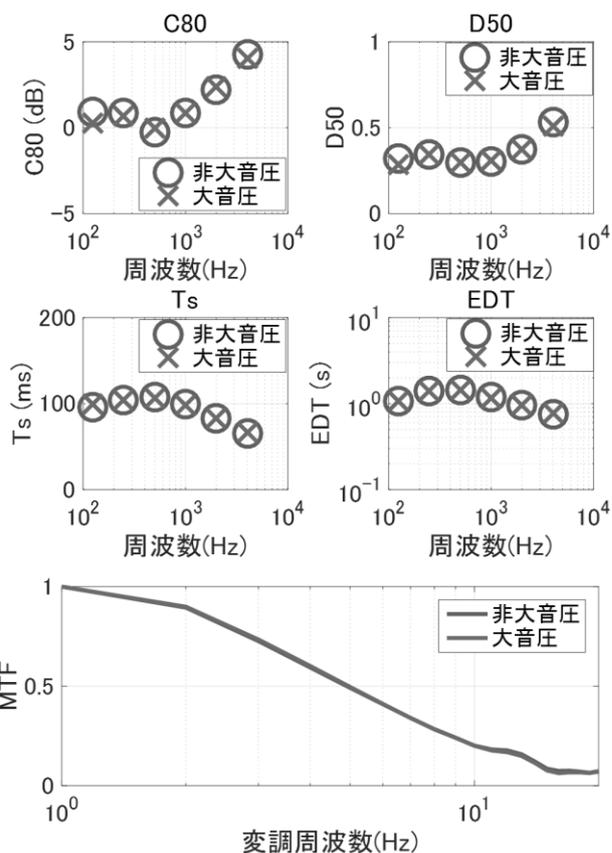


図8 測定点Cにおける室内音響特性測定結果

表3 測定点Cにおける各種室内音響特性の誤差量とJND (BOSE 101MM)

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	JND
C80(dB)	0.06	0.1	0.15	0.34	0.15	0.18	1
D50	0.005	0.005	0.002	0.02	0.013	0.007	0.05
Ts(ms)	2.2	0.9	1	2.1	2.5	0.9	10
EDT(%)	0.7	0.2	2.2	0.4	3	1.8	5

表 4 測定点 C における各種室内音響特性の誤差量と JND (VICTOR SX-WD30)

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	JND
C80(dB)	0.73	0.2	0.19	0.02	0.12	0.18	1
D50	0.046	0.001	0.003	0.005	0.003	0.024	0.05
Ts(ms)	5.1	0.6	0.6	0.8	0.4	1.3	10
EDT(%)	0.3	0.7	0.5	1.4	0.3	0.7	5

表 5 測定点 C における各種室内音響特性の誤差量と JND (TANNOY SYSTEM600)

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	JND
C80(dB)	0.25	0.21	0.03	0.01	0.08	0.03	1
D50	0.016	0.023	0.006	0.001	0.006	0	0.05
Ts(ms)	3.2	1.8	0.4	0.1	0.7	0.1	10
EDT(%)	4.6	0.2	0.4	0.1	0.3	0.2	5

6. 大音圧測定で問題となる歪

前章まででは入力が掃引正弦波のみであることを前提としてきた。掃引正弦波は単一時刻で見ると単一周波数の正弦波であるので、その非線形誤差は高調波歪と基本波歪のみとなる。しかし、条件によっては掃引正弦波以外の不要信号がスピーカに入力される場合がある。代表例として電源雑音(ハム)があげられる。そして、例えば2つの周波数の正弦波が非線形系に入力されたときには、それぞれの周波数 f_1 、 f_2 の整数倍の和と差の周波数 $nf_1 \pm mf_2$ (n, m : 整数)の成分をもつ混変調歪が発生する。

Log-SS を用いた場合に現れる混変調歪のモデル図を図9に示す[8]。図は得られたインパルス応答のスペクトログラムで、横軸は時間、縦軸は周波数を表している。時刻 τ_0 に存在する垂直方向の直線がインパルス応答を表す。実際には各周波数成分の応答が図の右側に広がっている。また、インパルス応答の左右の曲線が混変調歪である。

Log-SS を用いた場合の混変調歪の特徴としては、1) インパルス応答の時間前方(図の左側)だけでなく時間後方(図の右側)にも発生する、2) 低周波数成分ほど主応答から時間的に離れた位置に現れる、の2つが挙げられる。よって、低周波数帯域においてはこの混変調歪の影響が大きく、特性に異常が発生しやすいと考えられる。

図10に実際の室内で混変調歪が発生したときのインパルス応答のスペクトログラムを示す。測定条件は表6に示した。(a)の非大音圧時においては混変調歪成分を確認することはできないが、(b)の大音圧時においては混変調歪成分が確認できる。時間前方にある歪は分離可能であり、また、時間後方の高周波部分はイン

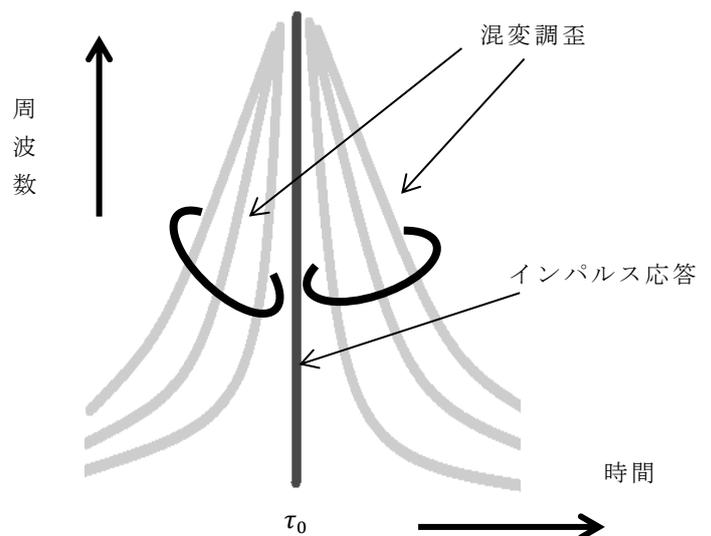


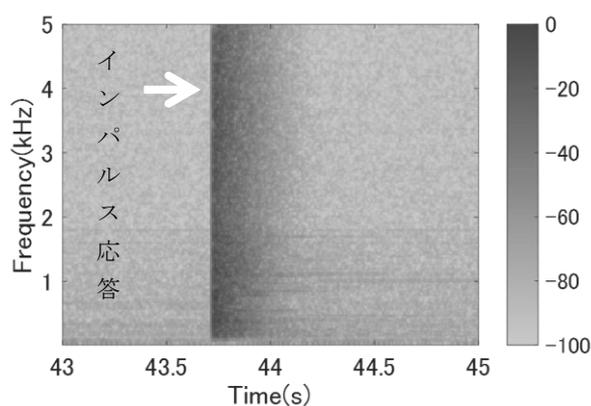
図9 Log-SS を用いた場合の混変調歪のモデル図

パルス応答の残響部分に埋もれており影響は小さいと考えられる。しかし、時間後方の低周波部分には混変調歪が明確であり、残響曲線への影響が予想される。

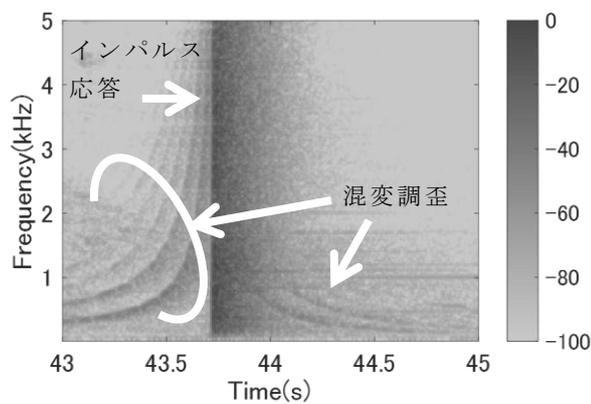
それぞれのインパルス応答から求めた残響曲線を図11に示す。図より、125Hz や 250Hz 帯域の低周波数帯域の残響曲線では大音圧測定時の残響曲線のレベルが上昇している。これは、混変調歪の影響が表れていると考えられる。

7. まとめ

インパルス応答を大音圧で測定すると高い SN 比が得られるが、非線形歪による測定誤差が発生する。本報告では、インパルス応答を用いて室内音響特性を算出する場合に、この測定誤差が及ぼす影響について評価した。その結果、音響再生機器の出力限界近くの大音圧で室内音響特性を測定しても代表的な室内音響特性は JND 以下の誤差で測定できることがわかり、大音圧測定の実用性が示された。ただし、電源雑音等、測定信号とは別の信号が再生系に同時に入力された場合には、測定信号との混変調歪によって残響曲線が変形する場合があるので注意が必要である。



(a) 非大音圧測定時



(b) 大音圧測定時

図 10 Log-SS を用いたインパルス応答測定時に発生した混変調歪

表 6 測定条件

実験室寸法	6.2×7.1×2.8 m
残響時間	約 0.5 秒
スピーカ	BOSE 101MM
アンプ	BOSE 1705-II
サンプリング周波数	48kHz
使用信号	Log-SS 信号

文 献

- [1] Y. Suzuki, F. Asano, H. Y. Kim, and T. Sone, "An Optimum computer-generated pulse signal suitable for the measurement of very long impulse responses," *J. Acoust. Soc. Am.*, 97(2), pp. 1119-1123, 1995.
- [2] J. Borish, "An efficient algorithm for measuring the impulse response using pseudorandom noise," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 31, no. 7/8, pp. 478-488 (1983 July/Aug.).
- [3] A. Farina, "Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique," in *108th AES Convention*, 5093, (D-4) (2000 Feb.).
- [4] 守谷直也, 金田豊, "雑音に起因する誤差を最小化するインパルス応答測定信号," *日本音響学会誌*, 64, 12, pp. 695-701 2008.
- [5] Y. Kaneda, "Noise Reduction Performance of Various Signals for Impulse Response Measurement," *Journal of the Audio Engineering Society*, 63, 5, pp. 348-357, May 2015.
- [6] 佐々木長閑, 金田豊, "インパルス応答に及ぼすスピーカの非線形歪の影響" *音響学会秋季講演論文集*, pp.761-762 2013.
- [7] ISO 3382-1:2009.
- [8] 佐藤 憲孝, 金田 豊, "掃引正弦波を用いたインパルス応答測定時に発生する非線形歪の検討," *電子情報通信学会応用音響研究会資料*, EA2015-35 (2015/11).

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 15H02728 の助成を受けたものです。

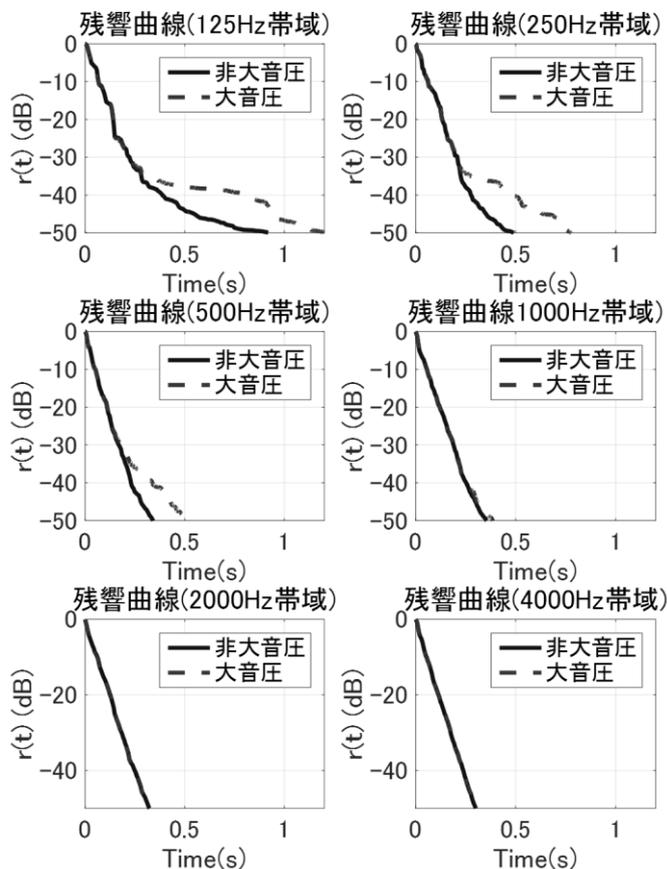


図 11 混変調歪の影響を受けた残響曲線