

音響インパルス応答測定の確からしさについての検討

森谷晃行^{†1} 金田豊^{†1}

概要: インパルス応答測定の性能を低下させる要因は多数存在する。音響的・電氣的雑音、スピーカの非線形特性、測定時の空気の流れの変動による時変性、熱などによるスピーカの時変性などがその要因として考えられる。それでは、最も一般的な音響測定である、スピーカから音を出して音響空間のインパルス応答を測定する、という場合に、どこまで高精度な測定が可能となるのであろうか？ 本研究では、筆者らの有する実験環境において可能な限り誤差要因を排除した場合の、インパルス応答の測定精度の限界について検討を行った。その結果、本実験条件におけるインパルス応答測定における測定誤差の最小値は約-55dBであった。

キーワード: インパルス応答

A Study on Measurement Probability of Acoustical Impulse Response

AKIYUKI MORITANI^{†1} YUTAKA KANEDA^{†1}

Abstract: There are a lot of factors to reduce a quality of the Impulse Response measurement. For example, acoustic or electrical noise, nonlinear characteristic of a loudspeaker, time-variant property by the change of the flow of the air and time-variant property of the loudspeaker. Then, how long can we measure Impulse Response precisely when we measure the Impulse Response of the sound space by using loudspeaker that is the most standard method of acoustic Impulse Response measurement? In this study, we considered the limit of measurement precision of the Impulse Response when we removed the error factors as much as possible in the experiment environment that the authors use. As a result, it was shown that the minimum error in the impulse response measurement was about -55 dB.

Keywords: Impulse Response

1. はじめに

インパルス応答は系の音響特性を表す重要な音響特性である[1]。インパルス応答は、残響時間を始めとした各種室内音響特性量の算出や、スピーカなどの音響機器の周波数特性測定に利用される。また、インパルス応答はコンサートホールのシミュレーションや頭部インパルス応答を利用した仮想現実感の実現にも利用されている。その他にも、インパルス応答は線形系の基本量であることから、線形系を対象とした様々な信号処理に利用されている。このインパルス応答を高 SN 比・短時間で測定するために、これまで、TSP, Log-SS, MN-SS 信号など、様々な測定信号が提案されてきた[2]~[7]。

しかし、応用によって要求されるインパルス応答測定の品質は異なる。たとえば、雑音レベルが低ければ、それほど高い精度でなくとも室内音響特性を算出可能である。一方、ノイズキャンセリングのような逆フィルタを用いた信号処理では高い精度の測定が要求される場合がある。したがって、応用に適した精度の測定を行わなければ、所望の特性量に対して過剰品質な測定となったり、信号処理の性能の低下の原因となったりする。

それでは、最も一般的な音響測定である、スピーカから

音を出して音響空間でのインパルス応答を測定する場合に、どこまで高精度な測定が可能なのであろうか？ 測定誤差が最小の状態を把握できていれば、その状態に対してさまざまな誤差要因を許容していくことで、各誤差要因の影響を評価することができる。

本研究では、筆者らの有する実験環境において可能な限り誤差要因を排除した場合の、インパルス応答の測定精度の限界について検討を行った。

2. インパルス応答測定時の誤差要因

インパルス応答測定の性能を低下させる要因は多数存在する。音響的・電氣的雑音、スピーカの非線形特性、音響空間やスピーカといった系の時変性などがその要因として考えられる。本研究では各誤差要因に対して以下のような対策をとった。

2.1 雑音

室内の音響的雑音を除去するため、測定は筆者らが有する無響室で行った。筆者らの使用する無響室では超低周波雑音の影響が残るため、カットオフ周波数 70Hz のハイパスフィルタを畳み込むことでその影響を低減した。しかし、それでも低周波雑音の一部が残ってしまう。また、測定結果には音響的雑音のほかに電氣的雑音が加わる。これらの

^{†1} 東京電機大学
Tokyo Denki University

雑音の影響を低減するため、一定の信号長で雑音レベルを最小化するインパルス応答測定信号である MN 信号[7]を用いた。また、測定信号の長さを大きくすることで雑音の影響を低減できるため、PC で処理可能な範囲で信号長を大きく定めた。

2.2 非線形歪

測定信号の再生音圧を大きくすることでも雑音による誤差の影響を低減することができる。しかし、再生音圧を大きくするとスピーカの非線形歪が生じるため、再生音圧に対して雑音性誤差と非線形誤差はトレードオフの関係にある[8]~[10]。本研究では、トレードオフ関係の測定結果を踏まえて再生音圧を決定した。

2.3 系の時変特性

系のインパルス応答が時間的に変化する要因として、風や室内空調による温度分布の揺らぎが考えられる。この影響は無響室で測定を行うことで排除できる。

また、何らかの原因でスピーカキャビネットが微小変位の振動をすると、スピーカ-マイク間距離 d が変化する。この変化はインパルス応答測定結果の時間ずれとなる。距離変位を Δd とすると、時間ずれ Δt は式で表される。

$$\Delta t = \Delta d / c \quad (c : \text{音速}) \quad (1)$$

このとき、インパルス応答 $\hat{h}(t)$ に対して測定結果 $h(t) = \hat{h}(t + \Delta t)$ の(正規化)誤差 E は

$$E = \overline{(h(t + \Delta t) - h(t))^2} / \overline{h(t)^2} \quad (2)$$

となる。この誤差を実測したスピーカのインパルス応答に基づいて計算した結果を図1に示す。図より、 0.1mm (10^{-4}m)の変位で -35dB 程度の誤差を生じ、変位の影響が大きいことが分かる。筆者らの通常測定では図2のようなスピーカスタンドを利用しているが、測定信号の再生時にスタンドが振動する可能性があるため、スピーカを図3のように床面に防振ゴムで固定して測定を行った。

室温の変化も系の時変の要因となる。音速 c が、 15°C からの温度変化量 ΔT により次式

$$c = 340 + 0.6 \cdot \Delta T$$

で表せるとし、 $d = 1[\text{m}]$ とすると、対応する時間変化は

$$\Delta t = 1/340 - 1/(340 + 0.6 \cdot \Delta T) \quad (3)$$

となる。図1と同様に、温度変化と誤差の関係を計算して図4に示す。図より、 0.1°C 程度の温度変化でも約 -30dB の誤差が生じ、測定誤差は温度変化に敏感であることが分かる。このため、室温に影響を与える照明は消灯して測定を行った。

また、スピーカ内部のコイルの発熱によっても系の特性が変化する。この対策として、測定開始前にスピーカのウォーミングアップを行うものとした。

以上に述べたように、スピーカのインパルス応答の測定誤差には3つの要因が考えられ、次式のように表される。

$$h_i(A) = \hat{h}_i(A) + n_i(A) + d_i(A)$$

ここで、 $h_i(A)$ は測定信号の振幅を A とした第 i 回目 (i : 整数)

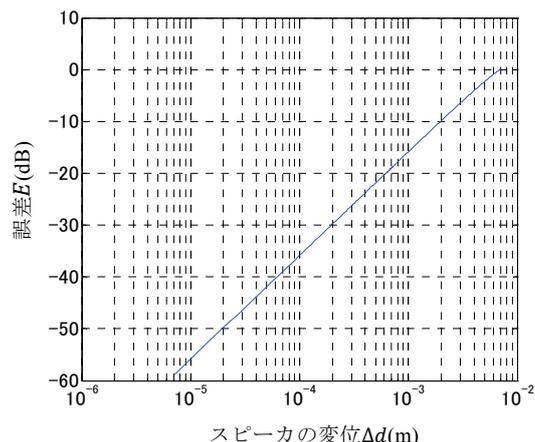


図1. スピーカの変位による測定誤差の計算結果



図2. スピーカスタンド 図3. 固定したスピーカ

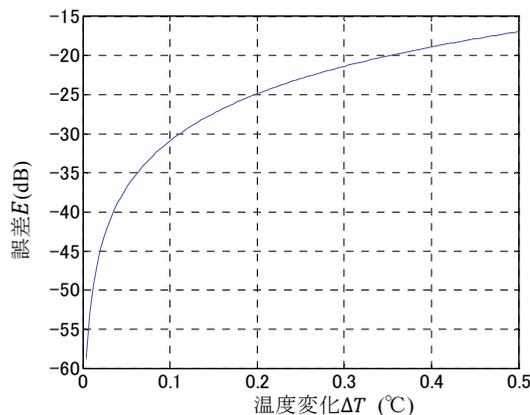


図4. 室温の変化による測定誤差の計算結果

の測定結果を表す。また、 $\hat{h}_i(A)$ は時間的に変化するインパルス応答の真値を表す。 $n_i(A)$ と $d_i(A)$ は、それぞれ測定結果に含まれる雑音に起因する誤差(雑音性誤差)と非線形歪に起因する誤差(非線形誤差)を表す。 $n_i(A)$ は信号振幅 A に反比例し、 $d_i(A)$ は A が大きくなると増大する。

3. 時変特性の測定

最初に、スピーカのインパルス応答の時変特性を調べる実験を行った。実験は無響室で行い、スピーカは TANNOY 600、アンプは B&K 2734 を使用した。測定には MN-PN (雑音最小化擬似雑音)信号を用い、サンプリング周波数 48kHz 、信号長 2^7 (約 2.7 秒)、再生音圧 70dB とした。測定は 800 回 (約 35 分) 繰り返し、800 回目の系の応答から算出したインパルス応答を基準として、各回の測定結果との誤差を

求めた。

図5の太線に、スピーカの使用開始直後からの800回の測定結果の誤差を示す。グラフの横軸は測定回数、縦軸は誤差量である。図5より、測定開始直後の誤差は約-20dBであり、その後誤差は基準インパルス応答（800回目の測定結果）に近づくにつれて減少する。

誤差の1つの要因としてインパルス応答の時間ずれが考えられるため、各回の測定結果と基準インパルス応答との時間ずれを調べた。具体的には、測定結果を1000倍補間して相関関数をとることで時間ずれを求めた。図6にその結果を示す。図より、1回目と800回目の測定では約 $1.7\mu\text{s}$ の時間ずれがあり、測定回数が増えるにつれて時間ずれは減少していく。そして、図5、図6を比較すれば、時間的なずれが大きい測定回は誤差も大きいことがわかる。

次に、この時間ずれを補正した後の誤差値を図5の細線に示す。太線で示した補正前と比較して誤差が大きく低減しており、時間ずれが時変特性による誤差の重要な要因であることが分かる。

さらに、図6より、測定（スピーカ再生）開始直後は時

間ずれが大きいことが分かるので、この問題を回避するために、約30分のウォーミングアップ（測定信号と同一信号の再生）を事前に行ってから800回の測定を行った。基準を650回目のインパルス応答として、誤差および時間ずれの測定結果を図7および図8に示す。ウォーミングアップを行っていない図5、図6の結果と比較して誤差や時間ずれは小さくなっているが、図8に示すように、ウォーミングアップを行っても微小な時間ずれの変化（ $0.05\mu\text{s}/10$ 分）が生じており、現状では対策が困難である。しかし、ウォーミングアップを行っていない場合（図5、図6）と比べて、誤差・時間ずれともに大幅に低下していることが分かる。また、基準時間（650回目）を含んだ130回程度（約5分）は誤差がほぼ一定であり、この範囲では時変特性の影響を除去できていると考えられる。

4. 測定精度の限界の検討

インパルス応答測定の測定精度の限界について検討した。信号長は 2^{24} （約6分）とし、再生音圧を30dBから70dBまで5dB刻みで変化させてインパルス応答を測定し、別途

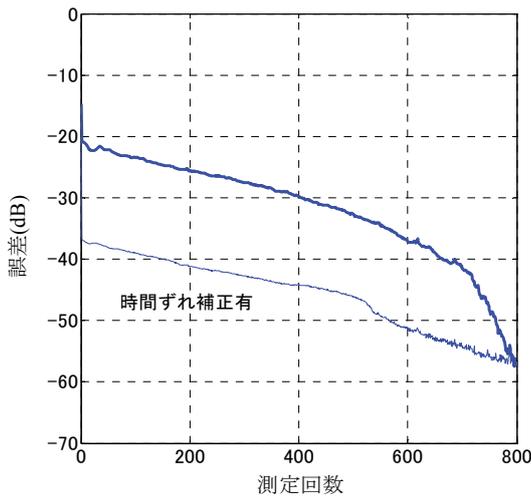


図5. 測定誤差の時間変化（800周期目を基準）

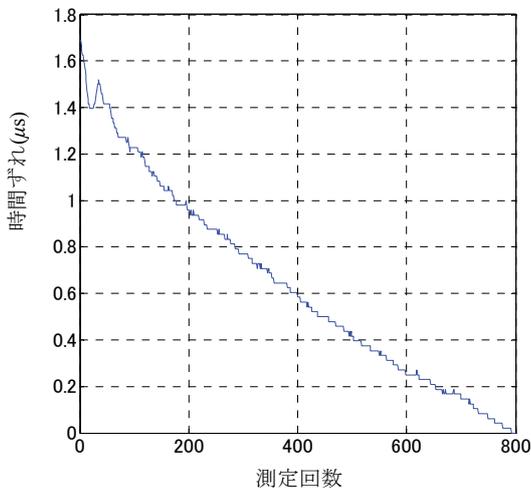


図6. 測定したインパルス応答の時間ずれ特性

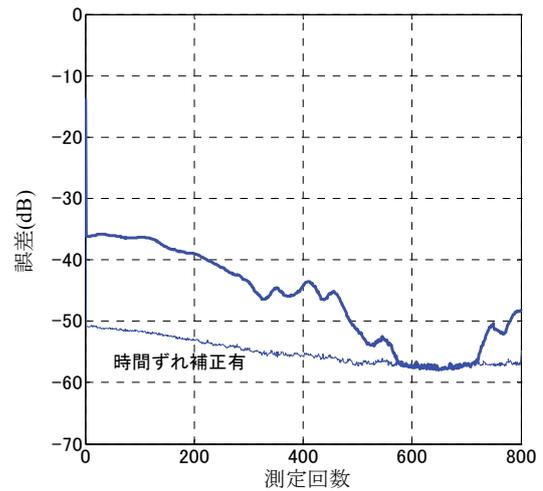


図7. ウォーミングアップ後の測定誤差の時間変化

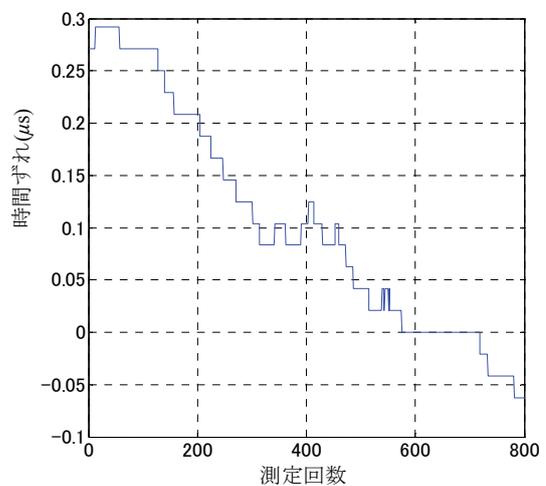


図8. ウォーミングアップ後の時間ずれ特性

測定した 50dB のときの測定結果との誤差を評価した。その際、各再生音圧の測定結果と基準波形との時間的ずれを補正した上で誤差を評価した。

図 9 に各再生音圧に対する誤差の測定結果を示す。図 9 より、再生音圧 30dB の時の誤差は約-43dB で、再生音圧を上げていくと誤差が減少していく。再生音圧 50dB の時の誤差が最小値約-68dB をとり、それ以降は再び誤差が上昇している。以下では、この誤差について検討する。

基準に取った再生音圧 50dB のときの測定結果を $h_{std} = \hat{h} + n_1 + d_{50}$ 、それと比較した再生音圧 50dB, 55dB のそれぞれの測定結果を $h_{50} = \hat{h} + n_2 + d_{50}$, $h_{55} = \hat{h} + n_3 + d_{55}$ とする。ただし、 \hat{h} は真のインパルス応答、 $n_1 \sim n_3$ はそれぞれの測定結果に含まれる雑音成分、 d_{50} および d_{55} はそれぞれ再生音圧 50dB, 55dB のときの測定結果に含まれるインパルス応答波形の基本波歪である。

再生音圧 50dB のときの誤差 e_{50} についてみると、 \hat{h} と d_{50} は共通であるため $e_{50} = \overline{(n_2 - n_1)^2} = \overline{n_2^2} + \overline{n_1^2}$ (= -68dB) と表せる。一方、再生音圧 55dB のときの誤差は $e_{55} = \overline{(n_3 - n_1)^2} + \overline{(d_{55} - d_{50})^2}$ (= -57dB) と表せる。ここで、雑音 $n_1 \sim n_3$ はランダムな確率過程であることから、測定結果に含まれる雑音成分の誤差は $\overline{(n_3 - n_1)^2} = \overline{n_3^2} + \overline{n_1^2}$ (< -68dB) とみなせる。

いま、 e_{55} 全体の誤差 -57dB と雑音成分の誤差 $\overline{(n_3 - n_1)^2}$ (< -68dB) とを比較すると、両者には 10dB 以上の差があるため、 e_{55} は基本波歪による誤差が占めていると考えられる。すなわち、 $e_{55} \approx \overline{(d_{55} - d_{50})^2}$ (= -57dB) とみなせる。同様に、 $e_{60} \approx \overline{(d_{60} - d_{50})^2} = -52.5\text{dB}$, $e_{65} \approx \overline{(d_{65} - d_{50})^2} = -49\text{dB}$, $e_{70} \approx \overline{(d_{70} - d_{50})^2} = -45\text{dB}$ である。さらに、再生音圧 50dB のときの基本波歪 d_{50} がそれより大きい再生音圧のときの基本波歪 $d_{55} \sim d_{70}$ に対して十分小さいならば、測定結果の誤差はその再生音圧の歪成分が占めているとみなすことができる。たとえば、再生音圧 70dB のときは再生音圧 55dB に対して 20dB の差があるため、測定結果に含まれる d_{70} は d_{50} に対して十分大きいと考えられる。したがって、 $e_{70} \approx \overline{(d_{70} - d_{50})^2} \approx \overline{d_{70}^2}$ と近似できる。以下では、このような近似に基づいて測定結果を検討した。

図 9 において再生音圧 70dB と 65dB のときの誤差の 2 点を通る直線を描き、その直線上の各再生音圧に対応する誤差の値と実際の誤差の値がどれだけ離れているかを評価した。その結果、再生音圧 60dB のときの直線の値は約-52dB であり、実測値とほぼ一致したが、再生音圧 55dB のときの直線の値は約-56dB であり、実測値から 1dB 程度小さくなった。これは、 d_{55} に対して d_{50} が無視できないため、 $\overline{(d_{55} - d_{50})^2} \approx \overline{d_{55}^2}$ の近似が成り立たず $\overline{d_{55}^2}$ よりも小さくなるためであると考えられる。また、直線は実測値に基づいて近似したものであるため、直線近似による値は 1dB 程度悪化すると考えられる。したがって、再生音圧 55dB のときの測定誤差は約-55dB が妥当であると考えられる。

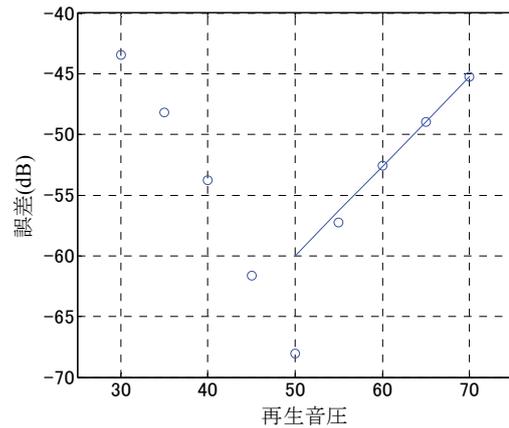


図 9. 再生音圧に対する測定誤差

5. まとめ

本研究では、スピーカのインパルス応答の測定時に生じる誤差要因について検討した。系の時変性が及ぼす影響について調べ、僅かなずれでもその影響測定誤差が大きくなることを確認した。しかし、系の時変特性の影響は時間的ずれが中心であり、時間ずれを補正すれば測定誤差をある程度低減できることを示した。また、誤差要因を可能な限り排除したときのインパルス応答の測定精度の限界について検討し、今回の実験条件では、測定精度の限界は約-55dBであることを示した。

参考文献

- [1] 橋秀樹. 室内音響測定の現状と今後の課題. 日本音響学会誌. 1993, vol. 49, no. 2, p. 97-102.
- [2] J. Borish. Self-contained crosscorrelation program for maximum-length sequences. J. Audio Eng. Soc. 1985, vol. 33, no. 11, p. 888-891.
- [3] N. Aoshima. Computer-generated pulse signal applied for sound measurement. J. Acoust. Soc. Am. 1981, vol. 69, no. 5, p.1484-1488.
- [4] Y. Suzuki, F. Asano, H. Y. Kim, and T. Sone. An Optimum computergenerated pulse signal suitable for the measurement of very long impulse responses. J. Acoust. Soc. Am. 1995, vol. 97, no. 2, p. 1119-1123.
- [5] 藤本卓也. 低域バンドでの SN 比改善を目的とした TSP 信号に関する検討—高調波歪の除去—. 音講論春. 2000, p. 555-556.
- [6] A. Farina. Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique. 108th AES Convention, 2000 5093, (D-4).
- [7] 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. 2008, vol. 64, no.12, p.695-701.
- [8] 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. 音講論秋. 2013, p. 761-762.
- [9] 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の際に発生する非線形誤差の検討. 音響講論秋. 2014, p. 741-742.
- [10] 小林正明, 金田豊. インパルス応答測定におけるスピーカの非線形誤差の検討. 音響講論秋. 2016, p. 431-432.