

小特集—「音を出す，音を取り込む」ときの落とし穴—

インパルス応答測定の際の留意点*

金田 豊 (NTT 研究所)**

43.85.-e

1. はじめに

インパルス応答は，デジタル音響計測や音響信号処理の基本となる物理量である。例えば，部屋のインパルス応答は，その部屋のエコータイムパターンそのものである。また，これをフーリエ変換すれば，音響伝達関数が得られ，2乗積分値を時間関数で表せば，残響曲線が得られる¹⁾。更にインパルス応答は，伝達特性を補正する逆フィルタを計算したり，音場制御などを行うための基本データともなる²⁾。

インパルス応答を測定する方法として，幾つかの方法が知られている。測定用の信号が利用できる場合には，M 系列法³⁾及び TSP 法⁴⁾が代表的である。これらの手法の測定原理は確立しており，また，市販の測定装置もあって手軽にインパルス応答測定が行われるようになってきている。

しかし実際に測定を行ってみると，測定原理に反した系の非線形性の影響などがあって，予想外の誤差も発生する。以下本稿では，そのようなインパルス応答測定の際の留意点を説明する。なお本稿では，断りのない限り M 系列信号を用いて測定する場合を想定する。TSP 法を用いる場合に関しては，本文の最後で議論する。

2. インパルス応答測定系

図-1 は，室内インパルス応答測定系の構成を示す。図において，まず，測定用デジタル信号 $A \cdot s(k)$ を計算機内で合成する。ただし， A は振幅を表すパラメータである。このデジタル信号 $A \cdot s(k)$ は，DA 変換器及び低域フィルタ (LPF) を経てアナログ信号 $A \cdot s(t)$ となる。信

号 $A \cdot s(t)$ は，スピーカに供給され，室内に音響信号として放射される。室内音響特性が付加された信号 $y(t)$ は，マイクロホンで受音され，低域フィルタ及び AD 変換器によりデジタル信号 $y(k)$ に変換され，計算機に送られる。

このとき， $s(k)$ がパルス信号であれば $y(k)$ はインパルス応答になる。しかし，パルス信号はエネルギーが小さいので，周囲騒音などがある場合には測定誤差が大きくなる。そこで，エネルギーの大きい M 系列や TSP 信号が $s(k)$ として利用される。この場合，測定用信号 $s(k)$ を時間軸上で反転して $1/A$ の振幅を持った信号， $1/A \cdot s(-k)$ ，を $y(k)$ と巡回的にたたみこむことで，図の①から②までのインパルス応答 $h(k)$ が得られる。

なお，図-1 は室内音響特性の測定系であるが，この部屋を無響室とすればスピーカのインパルス応答を測る系となる。また，マイクロホンとしてダミーヘッドを用いれば，HRTF (頭部伝達関数) のインパルス応答を測定する系となる。このように，図-1 は音響インパルス応答測定の基本的な系を表している。

3. スピーカ音量は適切に設定する³⁾ (小さすぎず，大きすぎず)

3.1 音量を上げて雑音性誤差を低減

測定系に雑音 (周囲騒音など) がある場合，測定結果に誤差を生じる。これを雑音性誤差と呼ぶことにする。図-2(a) は雑音性誤差が大きい場合の測定結果の一例を示す。インパルス応答が収束した測定区間後部 (図-2(b) に矢印で示した区間) は，本来，ほぼ零となるべき区間であるが，誤差の影響で零とはなっていない。

測定誤差を低減するためには，測定信号の振幅を大きくすれば良い。スピーカからの音量が大きくなって雑音に対する SN 比が向上し，図-2(b)

* Notes for impulse response measurement.

** Yutaka Kaneda (NTT Laboratories, Musashino, 180-8585)

に示すように雑音性誤差が低減する。

信号の振幅 A と雑音性誤差との関係は、図-3の直線①に示すように反比例の関係になる。例え

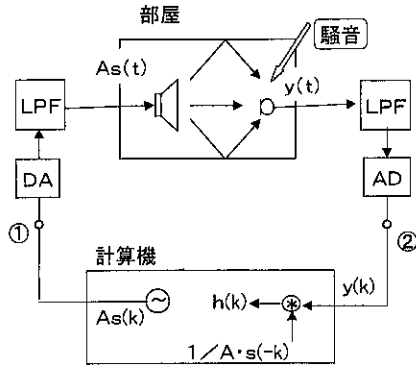


図-1 室内インパルス応答測定系の構成

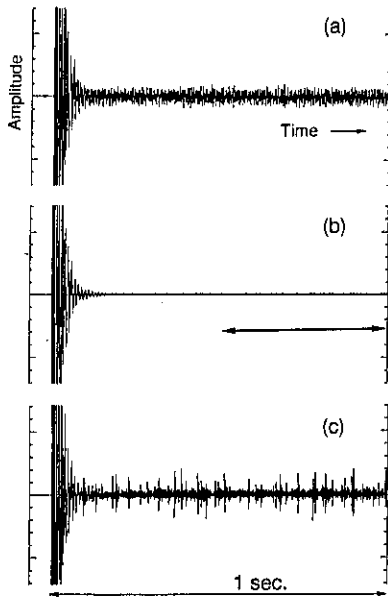


図-2 M系列法によるインパルス応答測定結果の例
(a)測定信号が小さいため雑音性誤差が大きい測定結果。
(b)測定信号の大きさが適切で誤差の小さな測定結果。
(c)測定信号が過大で非線形誤差の大きな測定結果。

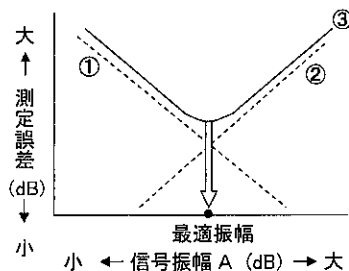


図-3 測定用信号の振幅 A と測定誤差の関係
①雑音性誤差。②非線形誤差。③測定結果に含まれる誤差 (=①+②)。

ば、信号振幅 (=スピーカ音量) を 10 dB 上昇させれば、雑音性誤差を 10 dB 低下させることができる。

3.2 過大音量による非線形誤差に注意

M 系列を用いて測定したとき、図-2(c)に示すように、不規則なパルス性の誤差波形が発生することがある。これは、測定系や被測定系の非線形性が原因の非線形誤差である。見た目にも不自然であるし、また、残響曲線を書かせた場合、後半部が階段状の曲線となってしまふので、回避したい誤差である。

非線形誤差の代表的な原因は、スピーカに対する過大入力である。従って、信号の振幅を小さくしてスピーカ音量を下げれば、非線形誤差は低下することが多い。筆者の実験結果では、過大入力による非線形誤差は、図-3の直線②に示すように、信号の振幅 A の大きさにほぼ比例する。例えば、信号振幅を 10 dB 小さくすれば、非線形誤差は 10 dB 低下する。

なお、M 系列信号 $A \cdot m(k)$ は 2 値 $\pm A$ のみの振幅を持つので、そのことが M 系列を特殊な信号として誤解する場合がある。その一例として、クリッピングなど、振幅方向の歪を受けない (振幅非直線変形を受けても、振幅は 2 値となり、波形は変形しない) と考えられることがある。しかし、2 値信号であるのは、M 系列がデジタル信

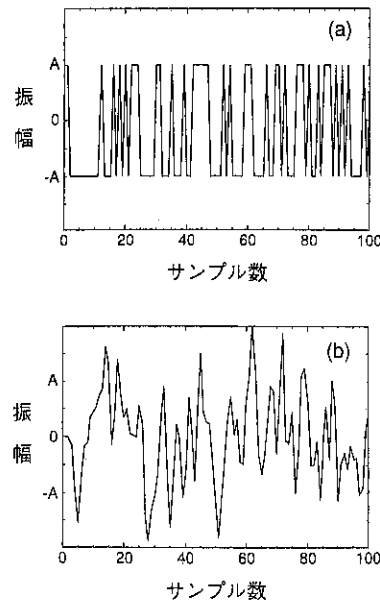


図-4 M 系列信号の、(a)デジタル波形 (連続的にプロットしたもの)、(b)アナログ波形

号である場合 (図-4(a)) のみである。DA 変換器の出力を低域フィルタに通過した、アナログ M 系列信号 $A \cdot m(t)$ は、図-4(b) に示すように通常のランダム雑音のような波形となっており、振幅非線形特性の影響を受けると変形する。

3.3 最適な音量の決定

以上説明したように、測定信号の振幅 A を増加させると、雑音性誤差は低下する (図-3 の直線①)。しかし、あまり A を増加させすぎると、スピーカの非線形の影響で非線形誤差が発生・増加する (図-3 の直線②)。このとき、測定結果に含まれる誤差は、雑音性誤差と非線形誤差の和となり、図の縦軸が対数値であることを考慮すれば、図-3 の③の線で示したような曲線となり最小値を持つ。

インパルス応答を最小誤差で測定するためには、この最小値を与える最適振幅 A_{opt} (最適音量) を求める必要がある。しかしこの最適値は、個々のスピーカの非線形特性や背景雑音レベルに依存するので、実験的に定める必要がある。すなわち、振幅 A の値を変化させて測定を繰り返しながら、次節 3.4 節の方法で誤差の大きさを推定し、図-3 の③に相当する曲線を描いて、最適振幅を求める。

3.4 測定誤差の大きさの推定方法

背景雑音が定常雑音なら、雑音性誤差は、測定結果の時間軸上に一様に分布する。また、M 系列を用いた場合には、非線形誤差も、不規則なパルス波形ではあるが、測定結果の時間軸上にほぼ一様に分布するという特徴を持っている。

誤差が測定結果の時間軸上に一様に分布するのなら、その一部の区間において誤差を計算すれば、全体に含まれる誤差が推定できる。つまり、図-2(b) に矢印で示した測定区間後部 (インパルス応答が収束し、誤差のみが含まれると考えられる区間) の誤差を計算すれば、測定結果全体の誤差の推定値とみなすことができる。従って、測定信号の振幅 A を変化させて測定を繰り返し、測定区間後部の誤差の大きさを計算すれば、図-3 の③に相当する曲線が得られる。

従来、非線形誤差が不自然なパルス波形として現れることは M 系列測定法の欠点と考えられていた。しかし、このことは逆に、非線形誤差発生 の警告と考えることができる。また、不自然な波

形であってもほぼ一様に分布するので非線形誤差の大きさの見積りが容易となる点は、M 系列法の利点と考えられる。

3.5 同期加算について

複数の測定結果を平均してランダム誤差を低減する、同期加算と呼ばれる方法がある。同期加算を行うと雑音性誤差は低下するが、スピーカの非線形誤差は低減できないので注意が必要である。なぜなら、何回繰り返しても、同じ測定信号に対しては同じ波形の非線形誤差が発生するからである。

3.6 その他の非線形誤差要因

スピーカへの過大入力以外にも、測定系や被測定系の、非線形性や時変性などが非線形誤差の要因となる。例えば室内の空気流による伝達特性のゆらぎなども、その例である。そのような場合には、入力振幅 A と非線形誤差との関係は、必ずしも図-3 の②のように直線的にはならない。しかし、そのような場合であっても、測定誤差は信号振幅 A の大きさに依存するので、前記で述べたように実験的に最適振幅を探す事は重要と考える。

4. インパルス応答波形は適切な長さに切り出そう

4.1 切り出しによって SN 比を改善

M 系列法や TSP 法では、長さ L の測定信号を使えば、長さ L の測定結果が得られる。インパルス応答を利用する際には、この測定結果を適当な長さに切り出して使用することが重要であ

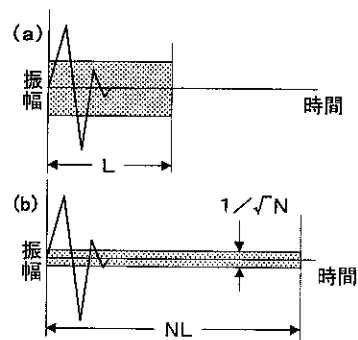


図-5 測定信号の長さ、一定の時間区間当たりの誤差の関係

(a)長さ L の測定結果。(b)長さを N 倍とした測定結果。一定の時間区間に含まれる誤差エネルギーは $1/N$ (振幅は $1/\sqrt{N}$) になる。

る。

インパルス応答波形は、測定結果の時間軸前部に偏在する。一方、M系列法では、誤差は測定結果に一様に分布する。従って、測定信号の長さ L を長くすれば、単位区間長当たりの誤差は低下する。例えば、図-5(a)(b)に示すように、測定信号の長さ L を N 倍にすれば、特定の時間区間、例えばインパルス応答の存在する区間に含まれる誤差エネルギーは、 $1/N$ (振幅では $1/\sqrt{N}$) となる。従って、測定信号の長さ L を N 倍長くして、インパルス応答の存在する区間だけ切り出せば、信号と誤差のエネルギー比は N 倍に改善できる。

4.2 切り出しの効果の例

部屋の残響曲線 $r(k)$ は、インパルス応答 $h(k)$ の2乗積分(2乗和)を用いて、次式のように計算される。

$$r(k) = \sum_{i=k}^L h^2(i) \quad (1)$$

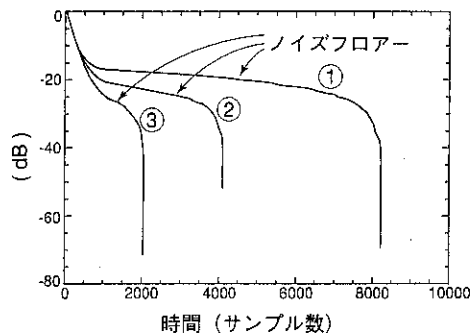


図-6 インパルス応答切り出し長と残響曲線の関係 (縦軸は対数値)
切り出し長は、① 8000 点 (1 秒) ② 4000 点 ③ 2000 点。

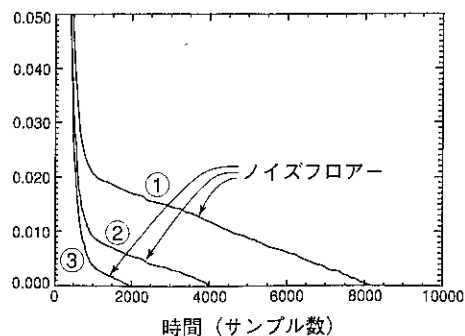


図-7 インパルス応答切り出し長と残響曲線の関係 (縦軸は真数値)
切り出し長は、① 8000 点 (1 秒) ② 4000 点 ③ 2000 点。
レベルの小さい部分を拡大表示しているため、レベルの高い部分はカットされている。

この2乗積分法を用いて残響曲線を描いた場合、図-6に示すように、ノイズフロアと呼ばれる曲線が見える場合がある。インパルス応答は指数減衰であるので、縦軸を対数値として描けば、残響曲線は直線となるはずである。図-6に例示したノイズフロアは誤差の影響である。

図-7のように縦軸を真数値として表すと誤差の影響が良く分かる。真の残響曲線は指数減少関数となるのに対して、一様分布した誤差が多く含まれる区間において、残響曲線は直線となる。

図-6と図-7との対応からノイズフロアと呼ばれる部分は、誤差の影響で真の残響曲線が見えなくなってしまった部分であることが分かる。インパルス応答を不必要に長く切り出して残響曲線を描くと、雑音区間を多く含んで残響曲線を計算することになるので、ノイズフロアが上昇して、真の残響曲線が隠されてしまう。図-6, 7における各曲線①②③は、それぞれ、長さ 8000, 4000, 2000 点で切り出したものである。短く切り出したほうが誤差の影響が低減し、真の残響曲線が低いレベルまで見えてくる。

4.3 切り出しの考え方

切り出しを短くすれば測定誤差は少なくなるが、同時に、真のインパルス応答の一部も切り捨ててしまう。図-8(a)にインパルス応答、(b)に一様分布した測定誤差(雑音性誤差と非線形誤差の和)の振幅包絡を模式的に表す。実際に測定された結果は(a)と(b)が加算された図-8(c)のよう

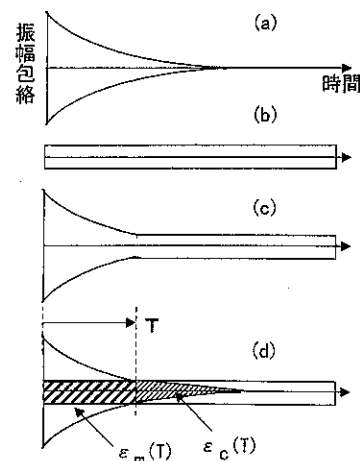


図-8 振幅包絡の模式図

(a) 真のインパルス応答。(b) 測定誤差。(c) 誤差の加わったインパルス応答測定結果。(d) 時刻 T で切り出した波形に含まれる測定誤差 $\epsilon_m(T)$ と切り捨て誤差 $\epsilon_c(T)$ 。

になる。測定結果(c)を、時刻0~ T の区間で切り出す(T 以降を切り捨てる)ことを考える。このとき、切り出したインパルス応答波形には、図-8(d)に示すように、測定誤差 $\epsilon_m(T)$ が含まれると共に、切り捨てるによる誤差 $\epsilon_c(T)$ が発生する。

測定誤差の2乗平均値(パワーに相当)を P_N とすると、時刻 T で切り出した区間に含まれる測定誤差エネルギー $\epsilon_m(T)$ は、 $P_N T$ となる。一方、切り捨てられたインパルス応答の誤差エネルギー $\epsilon_c(T)$ は、真のインパルス応答のエネルギーが指数関数 Ce^{-ak} (C :定数)で減衰しているとする、

$$\epsilon_c(T) = \sum_{k=T}^{\infty} Ce^{-ak} \quad (2)$$

となる。従って、時刻 T で切り出したインパルス応答の持つ総合的な誤差 $\epsilon(T)$ は、これら二つの誤差の和、

$$\begin{aligned} \epsilon(T) &= \epsilon_m(T) + \epsilon_c(T) \\ &= P_N T + \sum_{k=T}^{\infty} Ce^{-ak} \end{aligned} \quad (3)$$

となり、切り出し時刻 T の関数となる。

最適な切り出し時刻 T_{opt} は、 P_N , C , a の値を測定結果より推定して、誤差 $\epsilon(T)$ を最小にする時刻として求めることができる。しかし、近似的には、真数軸で描いた残響曲線が、誤差区間を表す直線から真の残響曲線を表す指数関数に変化するあたり(図-7の例では1000サンプル付近)、すなわち、雑音に埋もれていた真の残響曲線が見え始めるあたりを切り出し時刻 T と定めれば、ほぼ良好な結果を得ることができる。

5. TSP法との関連など

5.1 TSP法に関する留意点

TSP法の場合、雑音性誤差はM系列法と同様に、時間軸上に一様分布する。しかし、非線形誤差は偏在し、インパルス応答波形と重なってしまう場合もあって、測定結果からは非線形誤差が見えづらい⁶⁾。実際、TSP法では信号を大きくしていくと、後部の雑音性誤差はどんどん小さくなるので、信号を大きくしすぎる傾向がある。

5.2 TSP法とM系列法

この代表的な二つの方法の優劣はしばしば議論されるが、十分な答えは得られていない。それぞ

れの特徴を明らかにして、適材適所に利用していくことが望ましい。ここでは以下、個人的な考えを述べる。

TSP法は非線形誤差が見えづらいという点が長所とも短所ともなっている。すなわちインパルス応答波形の精度を追求するのではなく、波形の自然さや、雑音性誤差の低下が重要視される場合には、TSPの方が選ばれるであろう。一方、信号処理への利用を目的として誤差を極力小さくしたい場合には、現時点では、誤差の評価が容易なM系列法が有利であろう。

TSPの第2の特色としては、周波数が上昇する信号と、下降する信号の2種類を持っている点がある。この二つをうまく利用すれば、非線形誤差の検出や、回避などが行えるかも知れない。TSP法は日本で育てられてきた手法であるので、今後も一層の整備・充実を行っていきたい。

5.3 その他の考慮する点

測定系自身の持つ特性が問題となる場合もあるので、注意が必要である。一例として、従来型のDA変換器ではアパーチャ効果(保持効果²⁾)があって、高域では4dB程度低下する。また、急峻な折り返し防止フィルタを使うと、低周波数域の時間応答がかなり長くなってしまふ。その他にも様々な劣化要因⁹⁾が予想されるので、例えば電氣的に図-1の二つのフィルタを直結したり、また、反射の少ない条件で測定を行い、測定系自身の特性をよく把握してから測定を開始することが重要と考えられる。

6. むすび

本稿では、音響インパルス応答測定の際の留意点について述べた。多くの方には当たり前の話で恐縮であったが、私自身が長い間あいまいにしていた点を説明させていただいた。

注意すべきは、測定信号の音量を適切に設定すること、インパルス応答波形は測定結果から適切な長さで切り出して利用すること、という点である。また、測定系自身の特性も事前チェックが重要である。

説明は、主としてM系列法を前提として行ったが、TSP法に対しても共通事項が多いので参考にしていただきたい。このTSP法とM系列

法の、実用的な観点からの特質比較は、今後検討を進め、より使い易い測定手法として整備を行っていく必要があると考えている。

文 献

- 1) 橘 秀樹, “室内音響測定の現状と今後の課題,” 音響学会誌 **49**, 97-102 (1993).
- 2) 大賀寿郎, 山崎芳男, 金田 豊, 音響システムとデジタル処理 (電子情報通信学会, 東京, 1995).

- 3) 金田 豊, “M系列を用いたインパルス応答測定における誤差の実験的検討,” 音響学会誌 **52**, 752-759 (1996).
- 4) 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**, 1119-1123 (1995).
- 5) 金田 豊, “インパルス応答の測定における誤差の検討,” 音講論集, 567-568 (1995.3).
- 6) 例えば, 河田彰規, 金田 豊, “室内インパルス応答計測におけるスピーカの経時特性の影響,” 音講論集, 457-458 (1994.3).