

インパルス応答測定用純白色擬似雑音信号の時間軸変動耐性の検討

森 健太郎† 金田 豊†

† 東京電機大学大学院工学研究科 〒120-8551 東京都足立区千住旭町 5 番

E-mail: † {15kmc14@ms, kaneda@c}.dendai.ac.jp

あらまし インパルス応答測定は伝達系の線形時不変性を前提としている。従って、大空間測定時の風などによる伝達系の時間変動や、再生系の DA 変換器と録音系の AD 変換器の標本化周波数の微小なズレなどによる時間軸変動が発生した場合には測定誤差が発生する。そしてこの誤差は測定信号の種類によって異なり、TSP などの掃引正弦波を用いた場合には誤差が小さいが、M 系列などの白色擬似雑音を用いた場合には大きな誤差が発生する。この測定誤差は、従来の白色擬似雑音の振幅スペクトルが離散点でのみ白色で、それを複素補間した連続振幅スペクトルは白色から変動することが原因と考えられた。そこで、筆者らは、連続振幅スペクトルも白色特性を持つ純白色擬似雑音の考え方を提案し、その生成アルゴリズムを示した。そして、シミュレーションと実環境実験によって、純白色擬似雑音の時間軸変動耐性を検証した結果について報告する。

キーワード インパルス応答測定、擬似雑音、時間軸変動、純白色擬似雑音

Study on tolerance of time axis fluctuation of pure white pseudonoise signal for impulse response measurement

Kentaro Mori† Yutaka KANEDA†

† Graduate school of Engineering, Tokyo Denki University

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

E-mail: † {15kmc14@ms, kaneda@c}.dendai.ac.jp

Abstract In impulse response measurement, a time-invariant linear system is assumed. Therefore, measurement errors arise when there is temporal fluctuation in transmission systems caused by wind during measurement in a large space or a minute difference between the sampling periods of a digital-to-analog (DA) reproducing system and an analog-to-digital (AD) recording system. The magnitude of the errors depends on the type of measurement signal. The magnitude is small when a swept sine signal, such as a time-stretched pulse (TSP), is used; however, it is large when a pseudonoise signal, such as a maximum length sequence (M-sequence), is used. We consider that this error is caused by the fact that conventional white pseudonoise does not have a white continuous spectrum whereas its discrete spectrum is white. In this study, a new pseudonoise signal with a white continuous spectrum is proposed. We call this new signal a “pure white pseudonoise signal”, and its generation algorithm is presented. Simulations and experiments in a real environment show the effectiveness of the pure white pseudonoise signal for ensuring tolerance to time axis fluctuation.

Keywords Impulse response, Pseudo noise, Time jitter, Pure white pseudo noise

1. はじめに

インパルス応答測定は、系の周波数特性や残響時間等の音響特性を求める上で非常に重要である。このインパルス応答測定は伝達系の線形時不変性を前提としており、大空間測定時の風などによる伝達系の時間変動や、再生系の DA 変換器と録音系の AD 変換器の標本化周期の微小なズレなどによる時間軸変動が発生した場合には測定誤差が発生する。そして時間軸変動による誤差は測定信号の種類によって異なり、TSP[1]などの掃引正弦波を用いた場合には誤差が小さいが、M 系列[2]などの白色擬似雑音を用いた場合には大きな

誤差が発生する[3,4,5]。

しかし、擬似雑音は衝撃性の非常雑音（物体の落下音や足音など）に対する耐性を持つという、掃引正弦波には無い大きな特徴を持っている。したがって、測定環境によっては擬似雑音を用いた測定結果の方が優れる場合がある。そこで本研究では、このような長所を持つ擬似雑音の時間軸変動耐性の向上を検討した。

以下、時間軸変動による誤差発生 of 要因を検討し、その要因を除去した新しい測定信号である純白色擬似雑音を提案し、その有効性を検証する。

2. 時間軸変動による測定誤差

Fig. 1 に無響室で測定したスピーカのインパルス応答より求めた周波数振幅特性を示す。Fig. 1 (a) は、代表的な白色疑似雑音である M 系列を用いて測定した結果で、時間軸変動が無い場合のものである。Fig. (b) は同一条件で時間軸変動がある場合の測定結果である。図より、時間軸変動が発生した場合には、振幅特性の変動(誤差)が発生し、高域に行くにつれて大きな誤差になっている。また、Fig. 1 (c) は、時間軸変動がある場合に代表的掃引正弦波である TSP で測定した結果である。図より、掃引正弦波で測定した場合には時間軸変動の影響が小さいことがわかる。

Fig. 2 に伝達系の周波数特性 $H(k)$ (インパルス応答の等価量)を測定する模式図を示す。ただし k は離散周波数番号を表すが、図では省略している。図において時間軸変動がない場合(受信信号が $H(k)S(k)$ の場合)には、測定信号 $S(k)$ の種類によらず、逆フィルタをかけることで $H(k)$ が求められる。しかし、時間軸変動があると、誤差を含んだ測定結果、 $H'(k)S'(k)/S(k)$ となる。ただし $H'(k)$ 、 $S'(k)$ はそれぞれ時間軸変動の影響を受けて変動した周波数特性と測定信号成分を表す。

このとき、Fig. 1 より、測定信号の種類によって誤差が発生したりしなかったりすることから、誤差の主要因は測定信号のスペクトルが $S(k)$ から $S'(k)$ に変形することにあると考えられる。

3. 時間軸変動による信号スペクトルの変形

3.1. 時間軸変動による周波数変動

信号再生用 DA 変換器と録音用の AD 変換器が別個の装置であって、微小に異なったサンプリング周期を持つ場合の模式図を Fig. 3(a), (b), (c) に示す。Fig. 3(a) において○印は DA 変換を行う離散データを表す。これを標本化周期 T で DA 変換したアナログ信号は Fig. 3(a)の実線となる。

次にこのアナログ信号を、AD 変換器において T とは異なった標本化周期 T' でサンプリングした結果を Fig. 3(b)の□印に示す。Fig. 3(a) と (b) を比べると、AD された離散データ (□印)の値が元の離散データ (○印)の値と異なっている。Fig. 3(c) にこれらの離散データの時刻を揃えて重ね書きし、それらの補間曲線(対応するアナログ信号)を示す。図より、DA 前と AD 後では対応するアナログ信号の周波数が変化することが分かる。

Fig. 3 のように $T' > T$ の場合、Fig. 3(c) の AD データ (□印)に対応するアナログ波形(実線)の時間軸は圧縮されて周波数が上昇する。以降、この状況を時間軸の「圧縮」と呼ぶことにする。

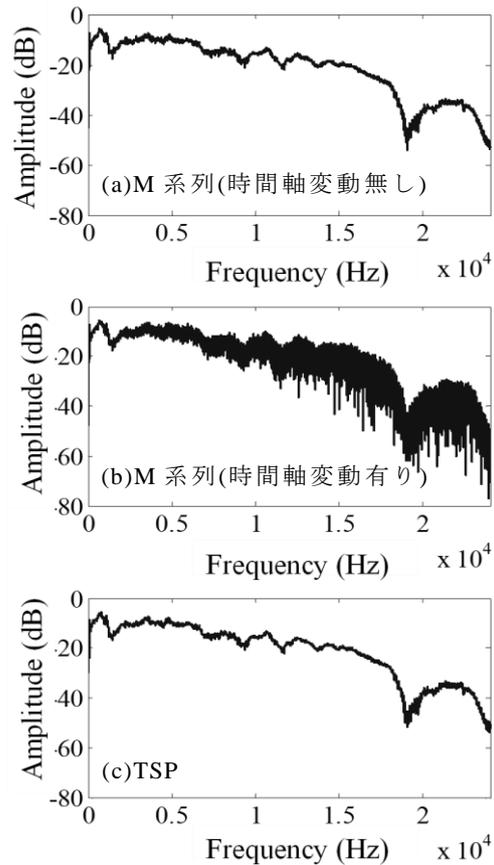


Fig. 1 時間軸変動が発生した場合の周波数振幅特性測定結果



Fig. 2 時間軸変動を含んだ周波数特性測定の模式図

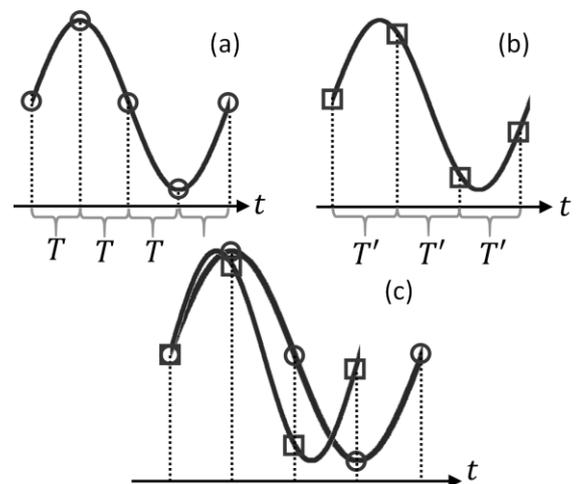


Fig. 3 DA 変換器と AD 変換器のサンプリング周期ズレの例 (a)DA 変換器での出力例, (b)AD 変換器でのサンプリング例, (c)DA,AD 変換時の離散サンプル点と補間曲線

3.2. 周波数変動による信号スペクトルの変形

白色疑似雑音の離散周波数振幅スペクトル $|S(k)|$ の一部を Fig. 4 の○印として示す。これらは周波数によらない一定値となっている。しかし、この周波数軸で離散なスペクトルに対応する連続スペクトルを求めると、その振幅スペクトルは Fig. 4 の実線のように大きく変動する。

周波数スペクトルは複素数であるので、連続スペクトルは複素補間によって求められる。複素補間のイメージ図を Fig. 5 に示す。○印の離散スペクトル $S(k)$ ($k = 0, 1, 2, \dots$)はすべて単位円上にあり、振幅値 $|S(k)|$ (矢印)は一定値を持つ。しかし、これを複素平面上で補間する(実線)と、離散スペクトル間の振幅値(矢印)は 1 から大きく変動する。

この時、時間軸変動が発生し、3.1 で述べたように、その影響で周波数軸変動が発生すると、離散周波数点の位置が微小にずれ、その時の振幅スペクトル $S'(k)$ (□印)の振幅値は 1 から変動してしまう。その結果、Fig. 4 での□印が示すように、離散振幅スペクトルが、元来の一定値から大きく変動した値となり、測定誤差の原因となる。

4. 純白色疑似雑音生成アルゴリズム

従来の離散白色疑似雑音では、離散スペクトルは白色であるが、対応する連続スペクトルは白色とはならない。このことが、従来の白色疑似雑音が時間軸変動の影響を強く受ける原因であった。

そこで筆者らは、この問題を解決するために、連続スペクトルも白色であるような、真の白色性を持つ雑音を提案する。連続スペクトルが白色であれば、時間軸変動の影響は小さいと考えられる。筆者らはこの新しい雑音を、「純白色疑似雑音」と呼ぶことにする。

この純白色疑似雑音の合成は、連続スペクトル(補間スペクトル)の振幅特性の強制的白色化を含んだ、Fig. 6 に示した繰り返しアルゴリズムによって行う。以下、番号に従って説明する。

- ① 初期信号として、長さ L の M 系列(または離散白色疑似雑音) $w(n)$ (n : 離散時間)を与える。
- ② $w(n)$ に十分な長さ(今回は $9L$ 個)のゼロを付加して DFT を行うことで、複素補間スペクトルを得る。
- ③ ② の処理(補間)によって得られた信号の振幅スペクトルは、Fig. 7 の黒線で示すように一定値から変動する。そこで、この振幅スペクトルを強制的に全周波数で 1(白直線)とし白色化する。ただし、位相はそのままの値を保持する。

- ④ ③ によって得られた周波数スペクトルを逆 DFT して時間波形に戻すと、長さ L を超えた時刻に非ゼロの成分が発生する。(Fig. 8)

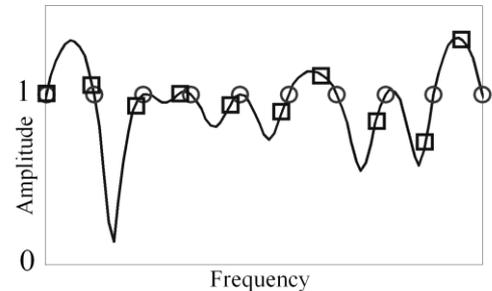


Fig. 4 白色疑似雑音の振幅スペクトル $|S(k)|$ (○印)と補間結果(実線)および時間軸変動結果(□印)

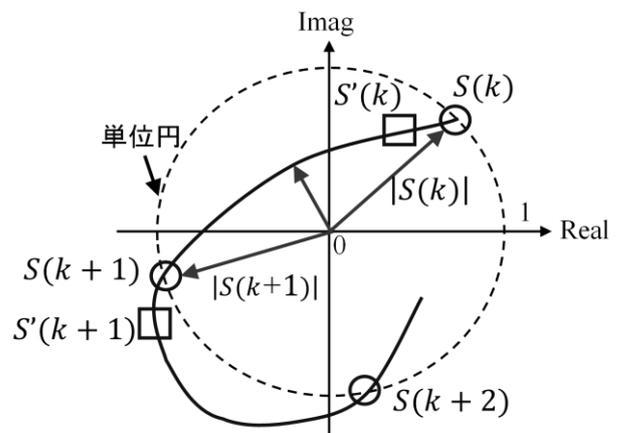


Fig. 5 複素スペクトルの補間のイメージ図

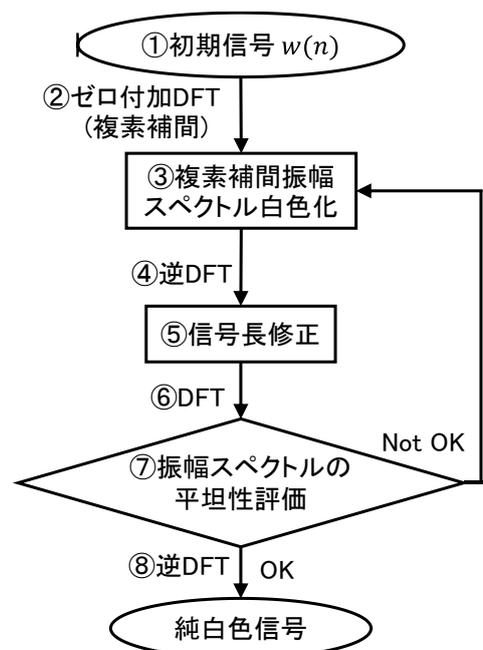


Fig. 6 純白色疑似雑音生成アルゴリズム

- ⑤ そこでこの非ゼロ成分を Fig. 8 の様に強制的に 0 とすることで、再び信号長を L にする。
- ⑥ 修正された時間信号に対して DFT を行う。⑤ の操作を行うことで完全な白色性は損なわれるが、初期段階の振幅スペクトルよりも白色に近いスペクトルが得られる (Fig. 9)。
- ⑦ スペクトルの白色性 (平坦性) を評価する。今回は、振幅スペクトルの dB 値としての平均値を求め、その値からのズレの最大値 ϵ_{\max} を評価量とした。そして、 ϵ_{\max} の値が閾値 (今回は、 $\epsilon_{\max} < 0.05\text{dB}$) を下回って十分な白色性が得られるまで③~⑥の処理を繰り返す。
- ⑧ 振幅スペクトルの白色性が閾値以下となった時点で処理を終了する。

Fig. 10(a) に、得られた純白色擬似雑音の時間波形を示す。波形は両端が小さな値になっている。この波形に $9L$ 個のゼロを付加して DFT した (補間した) 振幅スペクトルを Fig. 10(b) に示す。振幅スペクトルは補間してもほぼ平坦な白色スペクトルになっている。

5. 時間軸変動シミュレーション

5.1. シミュレーション条件

純白色擬似雑音の時間軸変動耐性を確認するためにシミュレーション実験を行った。シミュレーションでは各種測定信号 $S(k)$ に対して時間軸変動を加えて $S'(k)$ を求めた。時間軸変動は元信号の標本化周期 T に対して、異なった標本化周期 T' での再標本化を計算で実行することで、DA 変換器と AD 変換器の標本化周期の違いをシミュレートした。測定信号は、長さ L が 2^{14} の TSP 信号および $2^{14}-1$ サンプルの M 系列と純白色擬似雑音を用い、サンプリング周波数は 48kHz とした。時間軸変動は、標本化周期 T' が、

$$T' = \frac{L \pm 0.5}{L} T$$

となるような、時間軸の一樣な伸縮を加えた。

5.2. シミュレーション結果

Fig. 11(a), (b), (c) に時間軸を伸長した場合の、TSP、白色擬似雑音と純白色擬似雑音の振幅周波数特性を示した。Fig. 11(a) に示した TSP 信号の周波数特性は、時間軸変動を与えても全帯域においてフラットになっていることが確認できるが、Fig. 11(b) に示した時間軸変動を与えた白色擬似雑音の周波数特性は、高域ほど誤差 (振幅特性の変動) が発生していることが確認できる。

対して、純白色擬似雑音に時間軸変動を与えた場合の周波数特性は、Fig. 11(c) に示すように、全周波数帯においてほぼ平坦となっている。このように、時間軸

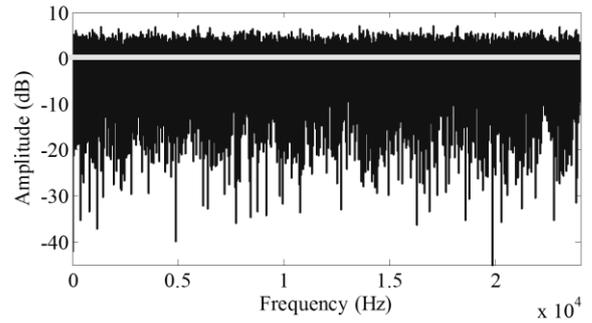


Fig. 7 補間した振幅スペクトルと強制的な白色化

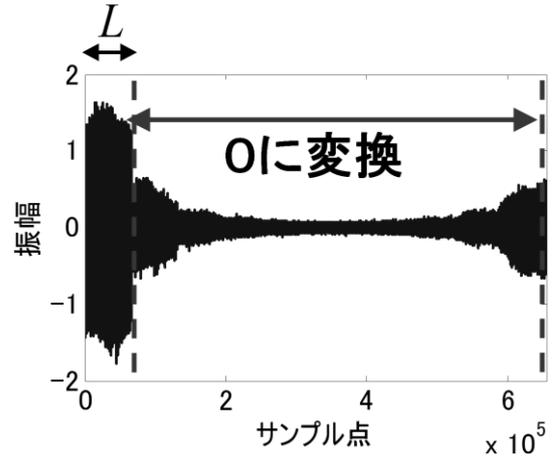


Fig. 8 非ゼロ成分の発生と信号長修正操作

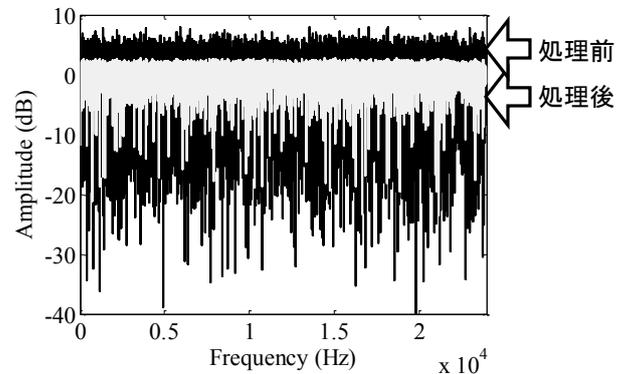


Fig. 9 一回処理を行った振幅スペクトル

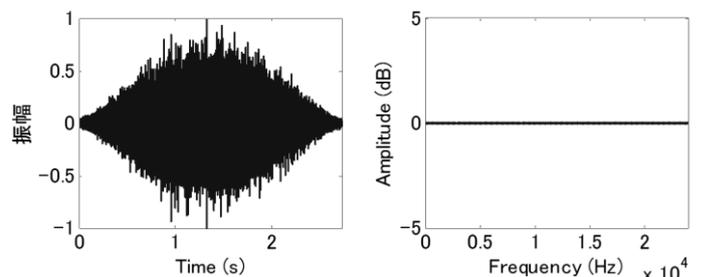


Fig. 10 純白色擬似雑音 (a) 時間波形

(b) 補間した振幅スペクトル

が伸長し、その結果周波数軸が圧縮 (サンプル点が右方向に移動) するような変動が発生しても純白色雑音の振幅スペクトルは、ほぼ一定の値を取るため影響を

受けなかった。

また、図は省略するが、時間軸が圧縮するような変動を発生させても Fig. 11 とほぼ同様の結果が得られた。以上より、シミュレーション上で純白色疑似雑音の時間軸変動耐性を確認することができた。

6. 実環境実験

6.1. 実験条件

次に実環境において測定実験を行い、純白色疑似雑音の有効性を検証した。Fig. 12 に示すように、再生・録音に別個の AIF(Audio interface)を用いてスピーカの周波数特性と室内音響周波数特性の測定を行った。このように DA と AD の AIF が別個となる状況は大空間測定でスピーカとマイク位置が離れていたたり、遮音測定でスピーカとマイクが別室に置かれている場合などに発生する。

AIF はローランド社製の UA-1EX、スピーカは BOSE101MM を用いた。ここで再生側の DA 変換器と AD 変換器間の標準化周期の差の割合を測定したところ、おおよそ 1.5×10^{-5} (標準化周波数 $Fs' = 48000\text{Hz}$ に対して、 $Fs' = 48000.7\text{Hz}$) 程度であった。しかし、この値は小さなものではなく、約 1.5 秒で 1 サンプルのズレとなる。

測定信号は M 系列(代表的な白色疑似雑音)と純白色疑似雑音を用いた。

6.2. スピーカの特性の測定

最初に無響室においてスピーカの周波数特性の測定を行った。測定はまず、同一の AIF (Fig. 12 の AIF1) で白色疑似雑音の再生と録音を行った。この場合、再生と録音の標準化周期は同一であるので、時間軸変動は無く、これを真値とみなした。次に、Fig. 12 に示すように再生を AIF1、録音を AIF2 で行い、白色疑似雑音と純白色疑似雑音を用いて時間軸変動のある場合の測定を行った。

Fig. 13(a)に真のインパルス応答、(b)(c)にそれぞれ時間軸変動がある場合の白色疑似雑音と純白色疑似雑音を使った測定結果を示す。白色疑似雑音の測定結果では、真値において本来応答のない波形後半部分にランダムな誤差成分が発生している。また純白色疑似雑音による測定結果にも同様な誤差が発生しており、インパルス応答波形の測定結果においては純白色疑似雑音の優位性は見られない。

一方、Fig. 14 は測定結果の全長でフーリエ変換して得た周波数振幅特性である。図より Fig. 1 と同様に白色疑似雑音の周波数振幅特性は大きな変動が発生しているが、純白色疑似雑音の結果では変動が抑えられている事が分かる。

Fig. 15 は全測定時間区間からインパルス応答を切り出して計算した周波数振幅特性を表す。切り出しを行

うことで、誤差波形の影響は軽減され、どの測定結果にも大きな振幅変動は見られない。しかし、白色疑似雑音で測定した振幅特性は、高域にいくにつれて真値より低下し、最大約 7dB 程度低下している。対して、純白色疑似雑音の結果は全周波数帯域において真値とほぼ同等の値をとっており、白色疑似雑音に対する優位性が示される。

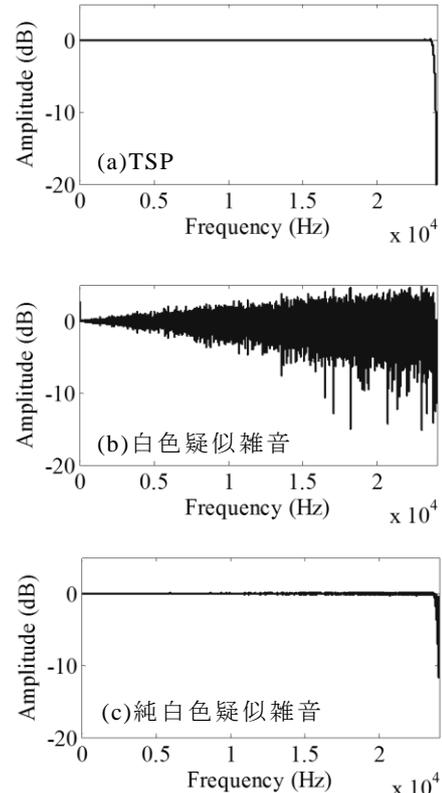


Fig. 11 時間軸変動シミュレーション結果 (a)TSP (b)白色疑似雑音 (c)純白色疑似雑音

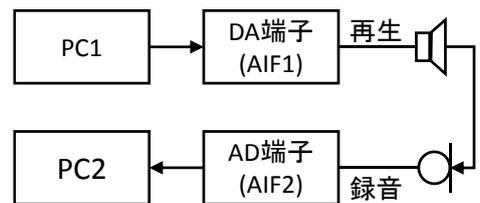


Fig. 12 接続配置図

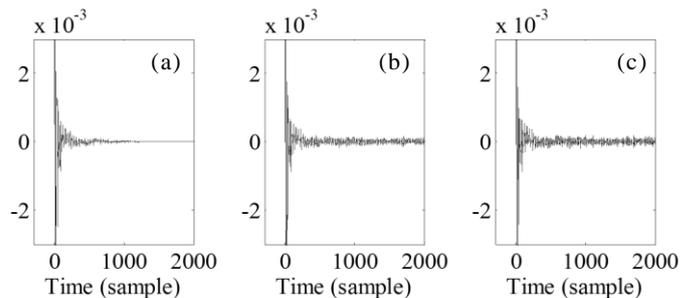


Fig. 13 インパルス応答測定結果 (a)真値 (b)白色疑似雑音 (c)純白色疑似雑音

6.3. 室内音響特性の測定

次に寸法が6.3×9.1×2.8m、残響時間が約1秒の室内において測定を行った。この時、実際の室内で測定を行うと、測定誤差に室内騒音の影響が混入してしまう。これを防止するために、あらかじめ高SN比で測定した室内インパルス応答を測定信号に畳み込み、それをAIF1のDA端子から発生させ、AIF2のAD端子に直結して測定した。また、6.2と同様に、同一のAIFで再生と録音をしたものを真値とみなした。

Fig. 16(a)に、白色疑似雑音と純白色疑似雑音で測定した周波数振幅特性を示す。しかし、この図では、室内特性の変動が大きく、評価が困難である。そこで移動平均により平滑化したスペクトルをFig. 16(b)に示す。図よりFig. 15の時と同様に白色疑似雑音の周波数特性の高域部分は純白色疑似雑音と比較して振幅特性が下がっていることが確認できる。また、違いの大きい高域部分を拡大してみると(Fig. 16(c))、白色疑似雑音は約2.5dB程度の低下が見られるが、純白色疑似雑音の測定結果は真値とほぼ一致した。

7. むすび

白色疑似雑音を用いたインパルス応答測定において、測定信号の再生・録音機器間の標本化周期のズレや風の影響による時間軸変動が測定誤差を発生させる。この誤差の要因は、離散白色疑似雑音の離散スペクトルを補間した連続スペクトルが白色ではなく、変動している点にあることを指摘した。そして、この問題を解決するために、補間した連続スペクトルも白色性を持つ純白色疑似雑音を提案した。

疑似雑音、純白色疑似雑音を用いたスピーカ特性の測定を行ったところ、インパルス応答の時間波形においては純白色疑似雑音においてもランダムな誤差波形が発生した。しかし、スピーカの周波数振幅特性の測定においては、白色疑似雑音では高周波成分が低下するのに対して純白色疑似雑音を用いるとほぼ誤差は生じず、疑似雑音に対する優位性があることを確認した。また、平滑化を行った室内周波数振幅特性においてもスピーカの周波数振幅特性の結果と同様に、純白色疑似雑音の優位性を確認することが出来た。

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。

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, 1119-1123 (1995).
 [2] D.D. Rife and J. Vanderkooy, "Transfer-Function Measurement with Maximum-Length Sequences." J. AudioEng. Soc., 37, 419-444 (1989).

[3] 中島 他, "TSP及びM系列を用いたインパルス応答測定における風の影響について," 音響学会講演論文集, 1-9-2 (1992-9).
 [4] 佐藤史明, 屋内音響インパルス応答の測定技術," 音学誌, 58, 10, pp. 669-676, 2002.
 [5] 矢野昌平, 波多野裕, 島田正治, "インパルス応答測定における時間揺らぎの影響," 信学技報, vol. J91-A, no. 3, EA2005-94, pp. 306-314, (2008).

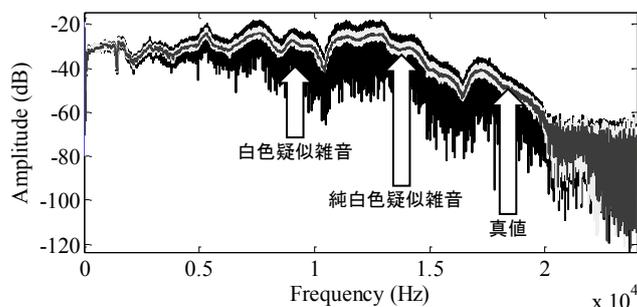


Fig. 14 各信号の時間軸変動発生時のスピーカの周波数振幅特性

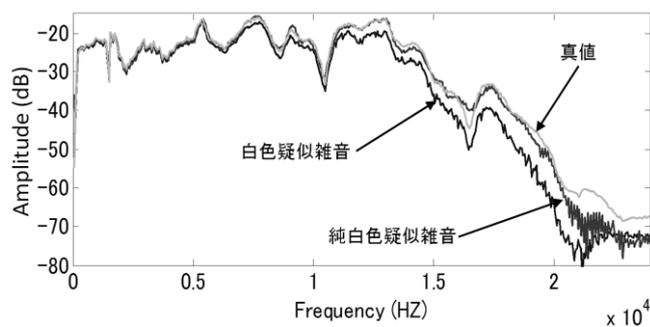


Fig. 15 インパルス応答を切り出して計算したスピーカの周波数振幅特性

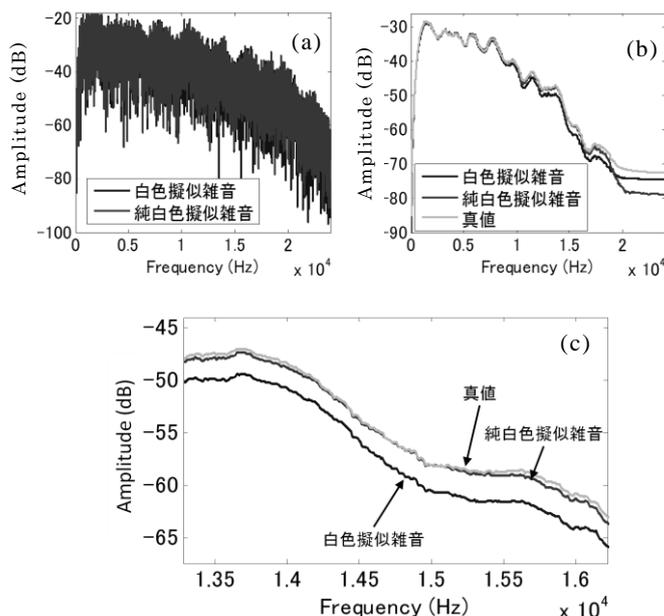


Fig. 16 各信号の時間軸変動発生時の室内の周波数振幅特性