

インパルス応答測定時に混入した非定常雑音を改善する手法の検討

木ノ下 亘[†] 金田 豊[‡]

^{† ‡} 東京電機大学 工学部 情報通信工学科 音響信号処理研究室

〒 120-8551 東京都足立区千住旭町 5 番

E-mail: [†] 17kmc02@ms.dendai.ac.jp, [‡] kaneda@mail.dendai.ac.jp

あらまし インパルス応答は音響系の周波数特性や残響時間を求めることが出来る重要な測定量である。一般的にその測定には、掃引正弦波信号や疑似雑音信号といった測定用信号を用いることで、定常雑音の影響を小さくした測定が行われる。しかし、その測定中に非定常雑音が混入すると、インパルス応答は著しく劣化してしまい、再測定が必要となる。そこで本研究では、(1) 非定常雑音が混入した時刻の検出、(2) 検出した時刻の信号の再測定、(3) それによって得た応答を元の非定常雑音が混入した応答に埋め込む、といった 3 つの手順で短時間で改善する手法を提案した。そして、掃引正弦波信号と疑似雑音信号を用いた実音場測定において、本手法の有効性を確認した。

キーワード 掃引正弦波信号, 疑似雑音信号, インパルス応答, 非定常雑音

A study of improving method for nonstationary noise contained in a measured impulse response

Wataru KINOSHITA[†] Yutaka KANEDA[‡]

^{† ‡} Graduate school of Engineering, Tokyo Denki University

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

E-mail: [†] 17kmc02@ms.dendai.ac.jp, [‡] kaneda@mail.dendai.ac.jp

Abstract The impulse response is an important system characteristic from which the frequency response and reverberation time of an acoustic system are derived. The impulse response is measured using measurement signals such as swept sine and pseudo-noise signals, which effectively reduce stationary noise. However, if nonstationary noise is included during the measurement, the impulse response deteriorates severely and remeasurement should be performed. In this study, we propose a method of reducing the nonstationary noise in a short time that involves three steps: (1) detect the time when nonstationary noise contaminates the impulse response, (2) remeasure the signal of the detected time, (3) replacing the original response containing the nonstationary noise by the remeasured response. The effectiveness of the proposed method is confirmed by an experiment in an actual sound field.

Keywords swept sign signal, pseudo noise signal, impulse response, nonstationary noise

1. はじめに

音響系の周波数特性や残響時間を求めるために、インパルス応答の測定は重要である。したがって、その測定を高い SN 比で行うことが求められている。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、TSP(Time Stretched Pulse) 信号^[1]や Log-SS(ピンク TSP)^[2]などの掃引正弦波 (Swept Sine:SS) 信号や、M 系列 (Maximal Length Sequence)^[3]を代表とする疑似雑音 (Pseudo Noise:PN) 信号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

数分またはそれ以上長くすることで信号のエネルギーを上昇させることも行われている。

しかし、これらのような信号を用いた測定中に、足音や物体の落下音といった非定常雑音が混入した場合には、測定結果は著しい劣化を受け、再測定が必要となる。その際、前述のように測定信号長が長い測定の場合は、大幅な測定時間の増加となってしまう。

本報告では、この問題を解決するために、(1) 非定常雑音の混入時刻の検出、(2) 検出した時刻の信号を再測定、(3)(2) によって得た応答の元の非定常雑音が混入した応答への埋め込み、といった 3 つの

手順によって短時間で非定常雑音の影響を改善する手法を提案する。そして、その提案手法を掃引正弦波信号と疑似雑音信号に対して用いた場合の有効性について検討した結果を報告する。

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、 $N(k)$ は定常雑音、 $1/S(k)$ 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 $N(k)$ がない場合、この応答信号 $H(k)S(k)$ に測定信号の逆特性 $1/S(k)$ を持つ逆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、定常雑音 $N(k)$ 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低減することができる。

3. 非定常雑音によるインパルス応答の劣化

図 2(a) は非定常雑音が混入した掃引正弦波 (Log-SS) 応答のスペクトログラムである。Log-SS 信号の応答は、時間が増加するに従って指数関数的に上昇する周波数成分を持っている。非定常雑音は短時間で広帯域な成分を持っている。図 2(b) は図 2(a) に逆フィルタをかけ、インパルス応答を求めたものである。図 2(b) の赤丸の部分において非定常雑音がインパルス応答に著しい劣化を及ぼしている。

4. 提案する非定常雑音の除去方法

3 節で述べたような非定常雑音が混入した場合、従来では再測定が必要であった。しかし、その場合大幅な測定時間の増加となってしまう。

本報告では、以下の 3 つの手順を用いて、短時間で非定常雑音の影響を改善する手法を提案する。

- (1) 非定常雑音が混入した応答 (測定結果) において、非定常雑音が存在する時刻を検出
- (2) 検出時刻を基にした測定信号の生成、再測定
- (3) (2) で得た応答を測定結果の非定常雑音が混入した箇所への埋め込み

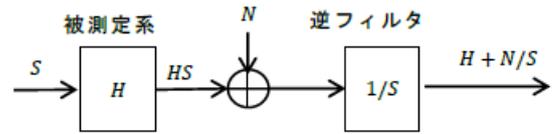


図 1. インパルス応答の測定原理

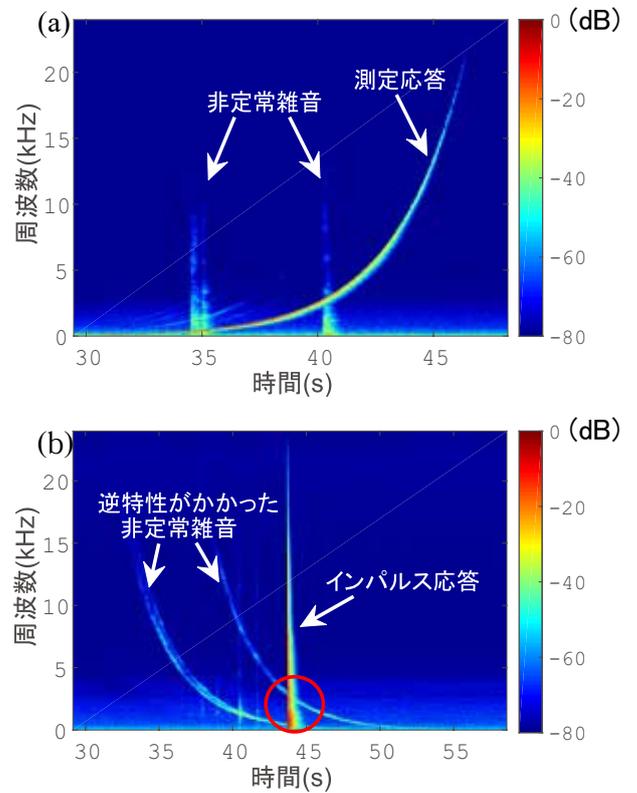


図 2. 非定常雑音によるインパルス応答の劣化

(a) Log-SS 信号を用いた測定応答、(b) (a) から求めたインパルス応答

以下、Log-SS 信号を用いた場合を例にして手法を説明する。

4.1. 非定常雑音の混入時刻の検出

図 2(a) からわかるように、非定常雑音の混入時刻は、スペクトログラム上では明らかである。しかし、混入時刻の検出アルゴリズムをスペクトル上で一般化するのは困難であるため、通常、時間波形で検出を行う。図 2(a) の時間波形を図 3(a) に示す。図 2(a) に示したスペクトログラム上では、非定常雑音が明確に見える場合でも、図 3(a) 青線のように、時間波形において、非定常雑音の振幅が測定信号や定常雑音の振幅より小さい場合には、非定常雑音 (赤波形) は明確に検出できない。

そこで、録音信号から測定信号成分を取り除くことで、非定常雑音の波形を明確化を図った。具体的

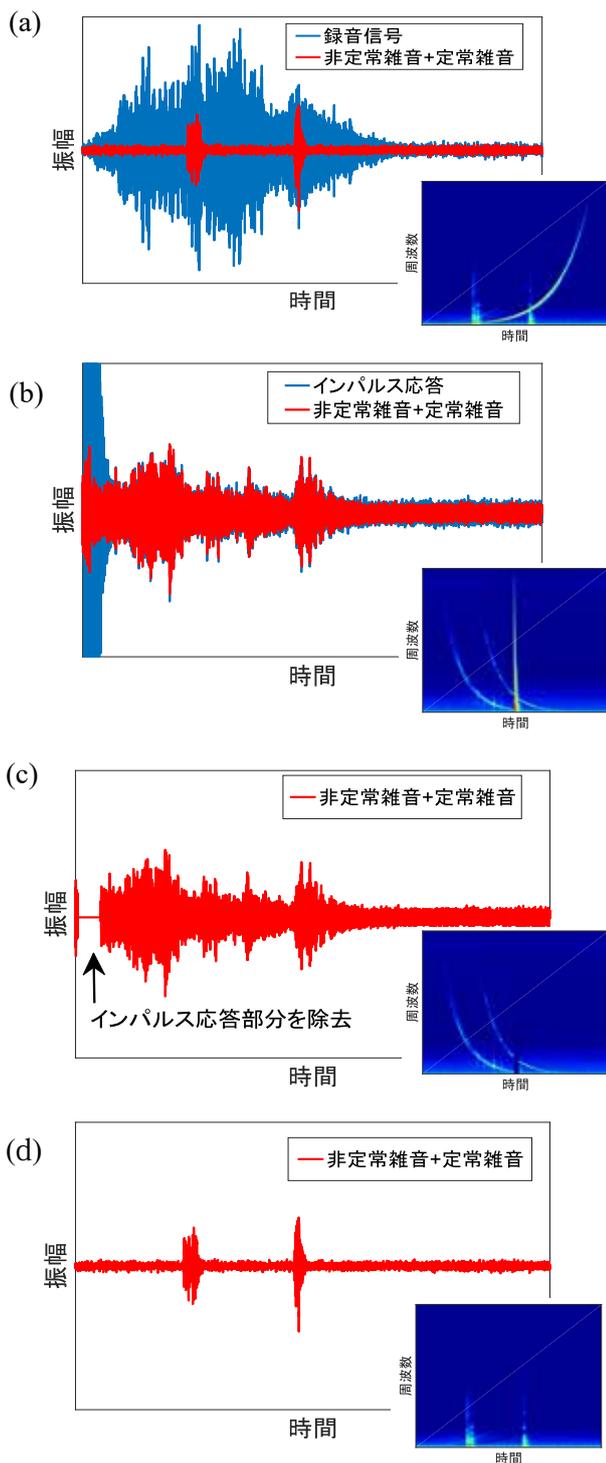


図 3. 非定常雑音の検出手順

(a) 録音信号、(b)(a)より算出したインパルス応答 (振幅を拡大して表示)、(c) インパルス応答成分を除去した信号、(d) 測定信号成分を除去した録音信号

な方法は、図 3(a) の録音信号に測定信号の逆フィルタを畳み込み、インパルス応答に変換する (図 3(b))。その波形の時間軸上でインパルス応答を取り除いた後 (図 3(c))、測定信号の特性を畳み込む

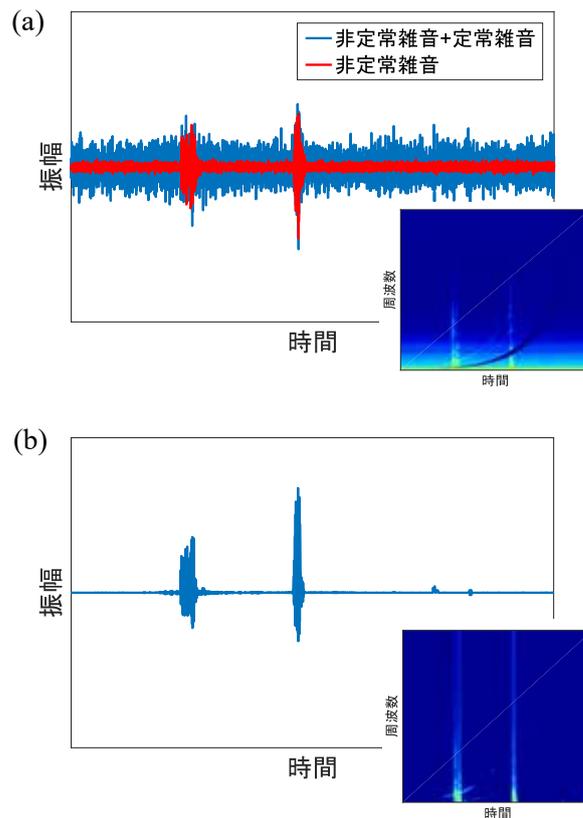


図 4. スペクトルサブトラクションによる非定常雑音の明確化

(a) 非定常雑音 + 定常雑音の時間波形、(b) スペクトルサブトラクションで定常雑音を低減した時間波形

ことで測定信号成分を除去した録音信号を得ることができる^{[4][5]}(図 3(d))。

しかし、上記の方法を用いた場合でも、図 4(a)のように測定環境における定常雑音の振幅が非定常雑音の振幅より大きい場合、非定常雑音は明確ではない。そこで、(1)式で示すスペクトルサブトラクション^[6]を行うことで定常雑音の影響を低減する。

$$\tilde{Y}(\omega, t) = Y(\omega, t) - \alpha P_N(\omega) \quad \dots (1)$$

$Y(\omega, t)$ は定常雑音と非定常雑音が混在している短時間スペクトルである (図 4(a) 右下)。ここから、定常雑音の平均スペクトルである $P_N(\omega)$ (α はゲイン定数) を減算することで、定常雑音の影響を低減した短時間スペクトル $\tilde{Y}(\omega, t)$ を得ることができる (図 4(b) 右下)。図 4(b) に $\tilde{Y}(\omega, t)$ から合成した時間波形を示す。図 4(a) と比較すると非定常雑音の存在時刻が明確になっている。

4.2. 検出部分の再測定

検出した非定常雑音の混入時刻を基に、再測定用

信号を生成する。再測定は短時間であることが望ましいので、非定常雑音の影響を改善できる範囲を適切に再測定用信号として設定する必要がある。

図5に非定常雑音(黄)が混入した測定応答(赤)のイメージ図を示す。非定常雑音には、黄色破線で示すような残響成分が含まれており、 T_1 の区間で測定応答が影響を受ける。図中の①は T_1 の時間に再生された測定信号とその応答(残響成分)を表している。また、 T_2 の時間に再生された測定信号は、それ自身は非定常雑音の影響を受けていないがその残響成分が②の範囲で影響を受けるため再測定が必要となる。したがって、 T_1 , T_2 の時間区間の測定用信号を生成して再測定を行う。ただし、再測定用信号の立ち上がりの影響を回避するため再測定用信号は T_2 より約1.5秒ほど前の時刻から生成している。また、後述するクロスフェード法のために T_1 より約1秒ほど後の時刻まで生成している。

このとき、測定信号の全長に比べて、 T_1 と T_2 の長さが小さければ、本手法は有効となる。

4.3. 再測定した応答の埋め込み

第1回目測定(以下、初回測定)において、非定常雑音を含んだ図5の T_1 の時刻の波形を切り捨てて、再測定した波形を埋め込む。その際、再測定した応答を初回測定の時間波形に適切に埋め込む必要があるため、相互相関関数とクロスフェード法を用いて、埋め込みの際の誤差を抑える。

まず、相互相関関数を用いて適切に埋め込む時刻の検出を行う。このとき、相互相関は初回測定の波形と、再測定応答の波形を用いて計算するが、初回測定の非定常雑音の影響を受けている部分 T_1 は、検出の誤差要因となるため、 T_2 の部分を用いて計算する。

次に、得られた時刻を基に再測定波形の埋め込みを行うが、初回測定と再測定では背景雑音が異なるため波形の不連続が発生する。これを改善するために、クロスフェード法を用いる。図6にそのイメージ図を示す。方法としては、再測定応答の両端と初回測定の埋め込み予定の範囲の両端に対になるような傾斜重み(0.5秒程度)を付け加算する。これにより、埋め込みの際の背景雑音による誤差を抑える。

5. 掃引正弦波信号に対する提案法の有効性検証

Log-SS信号を用いた測定において、4節にて提

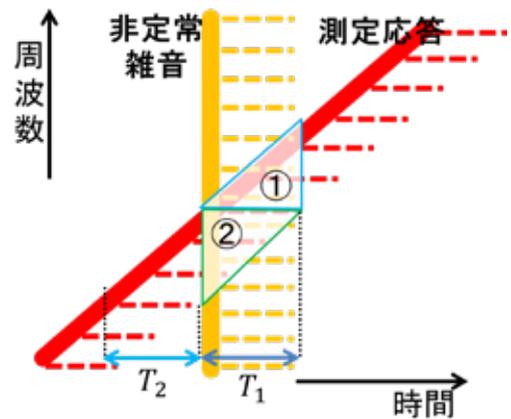


図5. 非定常雑音が混入した応答(イメージ)

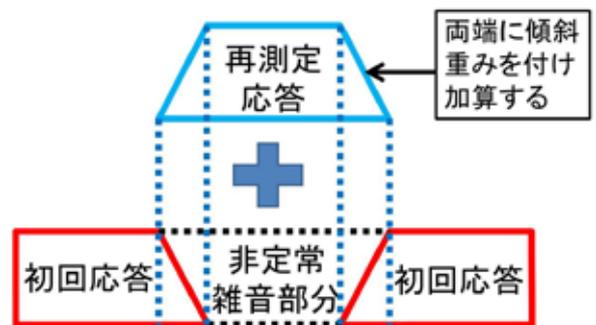


図6. クロスフェード法のイメージ図

案した手法を適用した実験を行った。

5.1. 測定条件

測定は、寸法が $9.1 \times 6.3 \times 2.8\text{m}$ 、残響時間が約1秒の実験室において測定した。サンプリング周波数は48kHz 信号長は 2^{22} (約87秒)とした。また、非定常雑音として咳払いの音を別途録音し、測定した応答に加算することにより非定常雑音が入った応答を作成した。なお、実際の信号長は87秒であるが、非定常雑音の見易さのために混入箇所を拡大して記載している。

5.2. 測定結果

非定常雑音が入った測定結果は図2(a)に示すものである。これに対して本手法を適用し、再測定結果を埋め込んだ録音信号のスペクトルを図7に示す。図2(a)と比較して、非定常雑音の影響が除去されていることが分かる。図8に非定常雑音除去後のインパルス応答を示す。図2(b)において赤丸で囲った部分のインパルス応答の劣化が改善されていることが分かる。

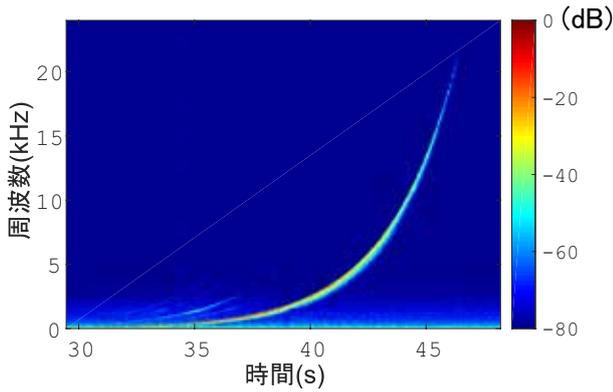


図 7. 改善後の Log-SS 応答

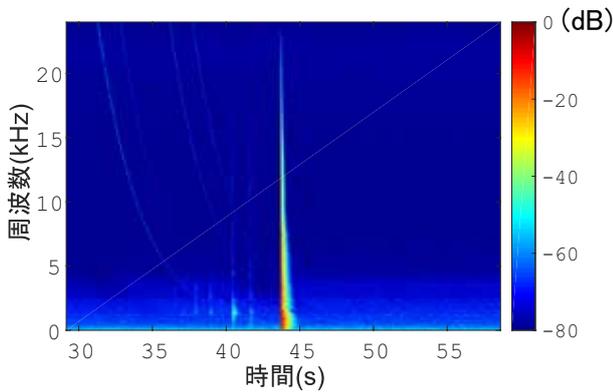


図 8. 改善後のインパルス応答

6. 疑似雑音信号に対する提案法の有効性検証

6.1. 測定条件

5 節で行った測定を疑似雑音信号に対して行った。測定条件は 5 節と同じで、測定信号はピンク疑似雑音信号を用いた。図 9 に非定常雑音が混入した疑似雑音応答のスペクトログラムを示す。

図 10 に図 9 に示した応答から計算したインパルス応答 (赤) と非定常雑音が混入していない場合のインパルス応答 (青) を示す。また、図 11 に図 9 に示した応答から算出したインパルス応答のスペクトログラムを示す。

一般に疑似雑音信号は非定常雑音の影響を受けにくいとされているが、図 10 を見ると、非定常雑音を含む場合は、含まない場合と比べて雑音成分のレベルが大きいことが分かる。これは、非定常雑音が疑似雑音信号の逆フィルタをかけられることによって定常雑音のような波形になり、インパルス応答の全時間に分布しているからである。このことは、図 11 の 0~5kHz の帯域においても、全時間域に広がった雑音成分として確認される。

6.2. 本手法の適用結果

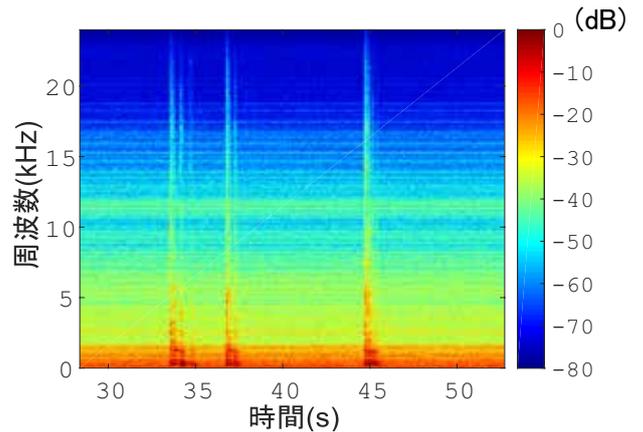


図 9. 非定常雑音が混入した疑似雑音応答のスペクトログラム

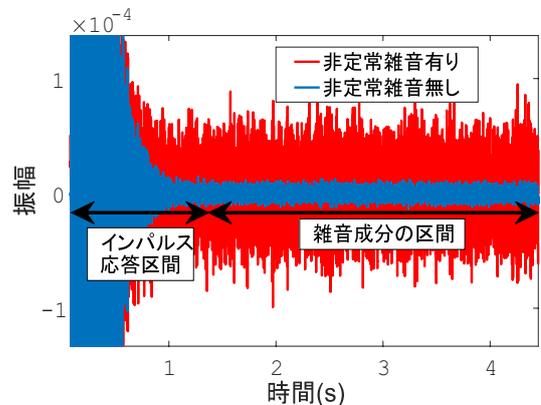


図 10. 非定常雑音の有無によるインパルス応答の時間波形の相違

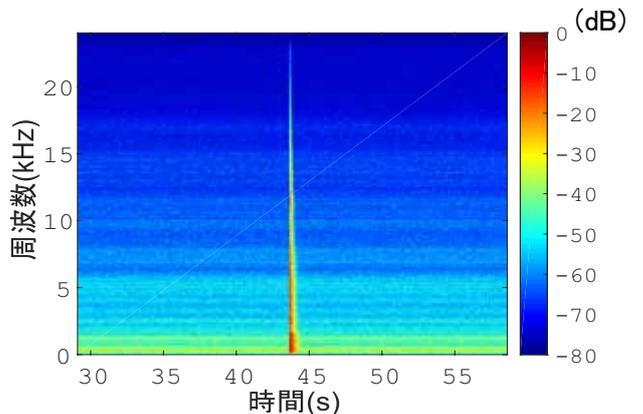


図 11. 図 9 に示した応答から算出したインパルス応答のスペクトログラム

本手法を適用して再測定を行い、改善を行ったピンク疑似雑音応答を図 12 に示す。図 9 と比較して、非定常雑音の影響が改善されたことが分かる。図 13 に改善後のインパルス応答を示す。図 11 において低域に存在していた雑音成分が抑圧されていることが分かる。また、このとき再測定を行った疑似雑音信号の長さは約 10 秒程度であり、信号の全長 87

秒と比較して、十分に短いものであると言え、短時間での改善であると言える。

6.3. 残響時間を用いた評価

提案法の有効性を示すために、測定したインパルス応答から残響時間を求めて、比較を行った。図14に真値(非定常雑音が混入していないインパルス応答)と非定常雑音が混入したインパルス応答、および提案法によって改善したインパルス応答それぞれから求めた残響曲線を示す。また、表1にそれぞれの残響曲線から求めた残響時間(T_{30})を示す。提案法を適用することで非定常雑音の影響を軽減でき、残響曲線及び、それより求めた残響時間は真値とほぼ同一の値が得られていることが分かる。

7. 結び

本報告では、インパルス応答測定時に混入した非定常雑音の影響を、

- (1) 非定常雑音の混入時刻の検出
- (2) 検出した時刻の信号を再測定
- (3)(2)によって得た応答の元の非定常雑音が混入した応答への埋め込み

といった、3つの手順を用いて改善する方法を提案した。そして、掃引正弦波信号と疑似雑音信号を用いた実音場測定を行い、本手法の有効性を検討した。提案法により改善したインパルス応答は非定常雑音を含まないインパルス応答(真値)とほぼ同一であった。また、再測定に用いた時間は測定信号の全長と比較して十分に短いと言えるものであった。従って、本報告における提案法は有効であると結論付けた。

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。

参考文献

[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] A. Farina, "Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept -sine technique," in 108th AES Convention, 5093, (D-4) Feb. 2000.

[3] 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.

[4] 葛山亮介, 金田豊, 福島裕一, "群遅延操作によ

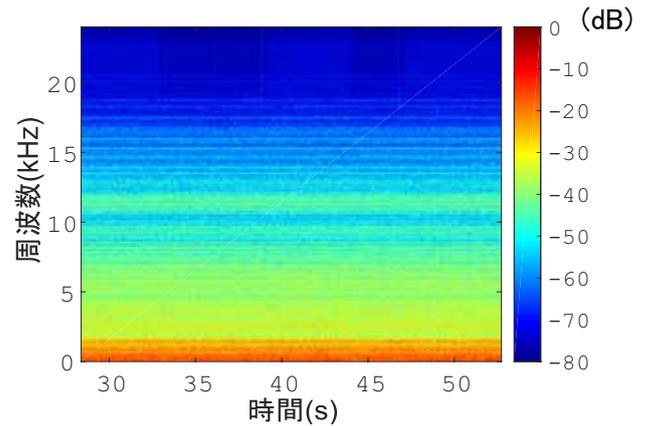


図 12. 改善した疑似雑音応答のスペクトログラム

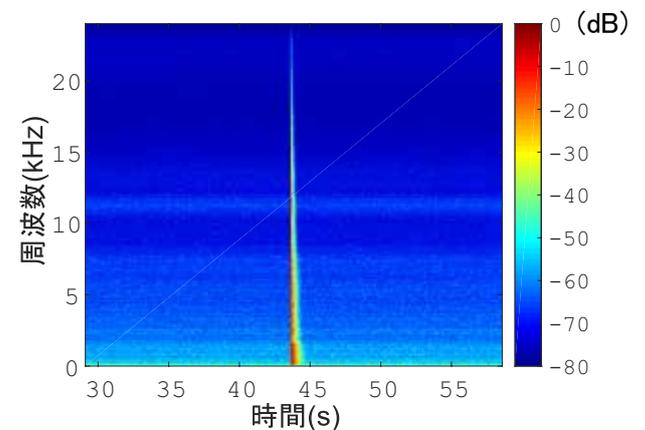


図 13. 改善したインパルス応答のスペクトログラム

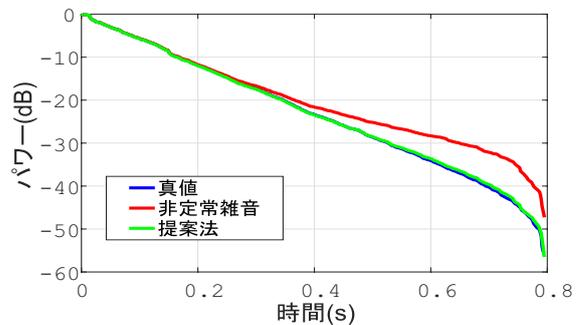


図 14. 残響曲線

表 1. 図 14 の残響曲線から求めた残響時間

	真値	非定常雑音	提案法
残響時間(s)	1.062	1.416	1.077

る信号抽出の検討", 日本音響学会春季講演論文集, 3-Q-15, 2006.

[5] M. Guski, M. Vorlander, "Impulsive Noise Detection in Sweep Measurements", ACTA ACUSTICA, Vol.101, 723-730, 2015.

[6] S.V. Vaseghi, Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction, John Wiley & Sons, 2000.