

# 実環境雑音下におけるインパルス応答測定波形の 最適切り出し方法の検討

渋澤 功<sup>†</sup> 金田 豊<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 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: <sup>†</sup> [11kmc19@ms, kaneda@c].dendai.ac.jp

**あらまし** インパルス応答はスピーカや室内の音響特性についての情報を数多く含んでいる。そのためインパルス応答の測定は大変重要である。しかし、測定環境において室内騒音などが付加されて SN 比が低下するという問題がある。従来は通常、インパルス応答を時間軸上で切り出していたが、SN 比の良い周波数成分を切り捨ててしまうという問題があった。本報告では Wiener Filter と帯域別切り出しを利用して従来法の問題点を改善した手法を提案した。そして、提案法を用いた雑音下における最適な切り出し法について検討した。その結果、1)従来法に比べ提案法の方が真値との平均二乗誤差が低減し提案法の有効性を確認できた、2)実環境雑音下において非定常雑音が発生しうる環境下では TSP 法よりも M 系列法のほうが雑音の影響を受けにくい測定が行えるということがわかった。

**キーワード** インパルス応答, 切り出し, Wiener Filter, TSP 法, M 系列法

## A study on impulse response waveform extraction under environmental noise

Isao SHIBUSAWA<sup>†</sup> Yutaka KANEDA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate school of Engineering, Tokyo Denki University,

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

E-mail: <sup>†</sup> [11kmc19@ms, kaneda@c].dendai.ac.jp

**Abstract** The impulse response contains a large amount of information about the acoustic characteristics of a loudspeaker or a room. Therefore, the measurement of the impulse response is very important. However, the SN ratio is reduced when environmental noise is added. To increase the SN ratio, the impulse response can be extracted on the time axis. However, this discards loss of the frequency components with a high SN ratio. In this paper, we propose a new method that mitigates the problems of the conventional method using a frequency-band-wise extraction and Wiener filter, and we study the extraction under real environmental noise. As a result, 1) the effectiveness of the proposed method is confirmed from the reduced mean squared error, 2) under a non-stationary noise environment, the MLS method is less affected by noise than the TSP method.

**Keywords** impulse response, response extraction, Wiener filter, TSP method, MLS method

### 1. はじめに

インパルス応答(IR:Impulse Response)はスピーカや室内の音響特性についての情報を数多く含んでいる。そのため、IR の測定は大変重要である[1]。しかし、測定環境において室内騒音などが付加されて SN 比が低下するという問題がある。この問題に対してこれまで様々な方向からの改善が試みられてきた[2]。本稿では実環境雑音下において計測した IR 波形を時間軸上で切り出すことで SN 比を向上する手法の検討を行った。

一般に IR の測定は十分に長いデータ長で行われる

ので、測定結果の後半は雑音区間(もしくは IR が雑音より十分に小さい区間)となっている。この測定結果をそのまま使うと不要な雑音が多く含まれることで SN 比が悪くなる。そのため、雑音部分を切り捨てて必要な部分のみを切り出す操作が必要となる。

図 1 は定常雑音が付加された IR 波形のモデル図である。縦ハッチ部分が IR、斜ハッチ部分が雑音を表している。従来の多くの方法ではインパルス応答の短時間パワーが雑音パワーと等しくなる時刻(図 1 の破線)付近で切り出しが行われてきた[3][4]。

この時間波形における切り出し(以降「波形切り出し」と呼ぶ)は IR に含まれる全周波数成分を同一時刻で切り出すものである。しかし、実際には周波数によって IR の長さは異なり、また雑音のパワーも異なる。図 2 は、実測した室内インパルス応答(室容積 $120m^3$ 、残響時間 0.6s)に、標準的な室内騒音である Hoth 雑音[5]を付加した場合のスペクトログラムで、横軸に時間、縦軸に周波数として表したものである。雑音の低域成分のパワーが大きいので、図 1 のモデル図に示すように約 30ms で IR の短時間と雑音の短時間パワーは等しくなり、0~30ms の範囲で IR は切り出される。

この波形切り出しは、図 2 の破線に示すように全帯域同一時刻で切り出しが行われることになる。しかし、高周波域では IR も長時間継続しており、また雑音成分も少ない。全帯域での切り出しを行った場合、図 2 に丸印で囲った、SN の高い周波数成分の応答が切り捨てられるため、誤差要因となる。

この問題を解決するため、本報告では Wiener Filter を用いて帯域別の雑音抑圧を行い、その後、帯域別の切り出し時刻で IR の切り出しを行う方法を提案する。

## 2. Wiener Filtering

信号の SN 比を向上させる代表的な手法として Wiener Filtering(以下 WF)がある[6]。この手法は測定信号の平均二乗誤差を最小にするフィルタを用いて雑音を抑圧する手法である。

WF は測定信号の短時間フーリエ変換に作用する時変フィルタで次式の時間-周波数特性 $G(n, k)$ を持つ。

$$G(n, k) = P_s(n, k) / (P_s(n, k) + P_N(k)) \quad (1)$$

ただし、 $n$  は離散時間を表し、 $k$  は離散周波数を表す。また、雑音は定常雑音を仮定し $P_N(k)$  は雑音の短時間パワースペクトルの平均値、 $P_s(n, k)$  は信号(真値)の短時間パワースペクトルを表す。式(1)より、ある時間一周波数区間において、 $P_s(n, k) \gg P_N(k)$  であれば $G(n, k) \approx 1$ となって信号はそのまま出力される。一方、 $P_s(n, k) \ll P_N(k)$  すなわち、ほぼ雑音のみの区間であれば $G(n, k) \approx 0$  となって雑音は抑圧される。

しかし、現実的には真値は知ることができないので雑音を含んだ測定結果のパワースペクトル $P_{SN}(n, k)$  を用いて

$$G(n, k) = (P_{SN}(n, k) - P_N(k)) / P_{SN}(n, k) \quad (2)$$

と近似計算した特性を用いる。

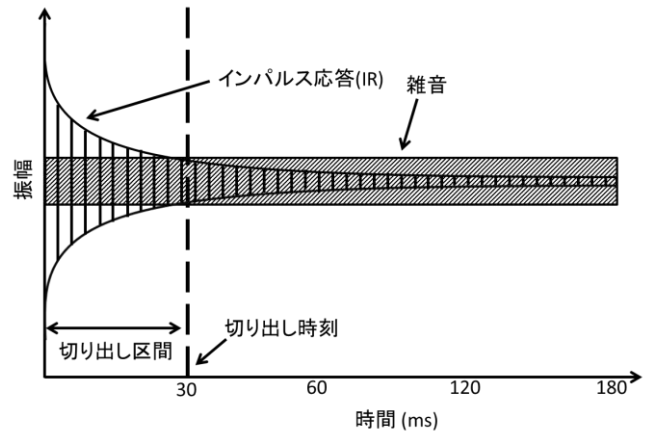


図 1 雑音が付加された IR と波形切り出しのモデル図

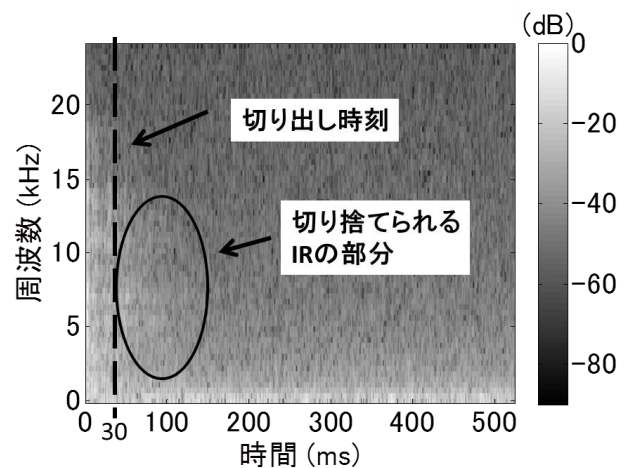


図 2 Hoth 雑音に加わったインパルス応答(IR)のスペクトログラムと時間波形上で切り出し(全帯域での切り出し)の欠点

## 3. 提案する手法

本稿で提案する手法の処理手順を図 3 に従って説明する。

①雑音に加わった IR に短時間フーリエ変換を行ってサブバンド信号とする。

②このサブバンド信号に WF を行う。ただし WF における雑音のパワースペクトル $P_N(k)$  は測定された信号において雑音のみが含まれると考えられる時間区間を用いて計算しておく。また、式(2)の分子項が負値になる場合は $G(n, k) = 0$  とした。

③WF 出力に対して帯域別切り出しを行ってインパルス応答収束時刻以降の雑音成分を抑圧する。(詳細は 4 節)

④サブバンド信号を逆 DFT し、overlap-add 法によって IR を再合成する。

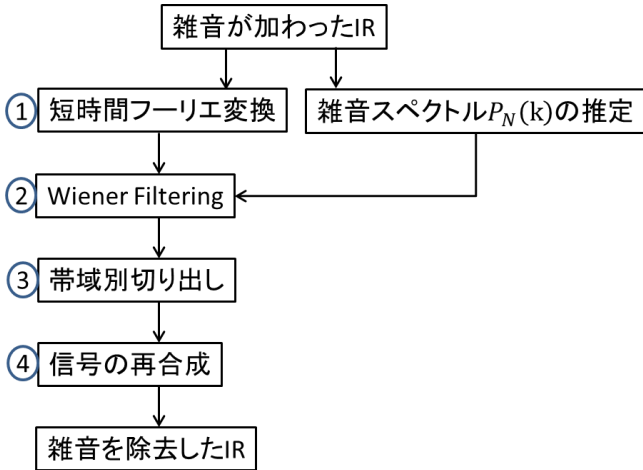


図3 提案法の処理手順

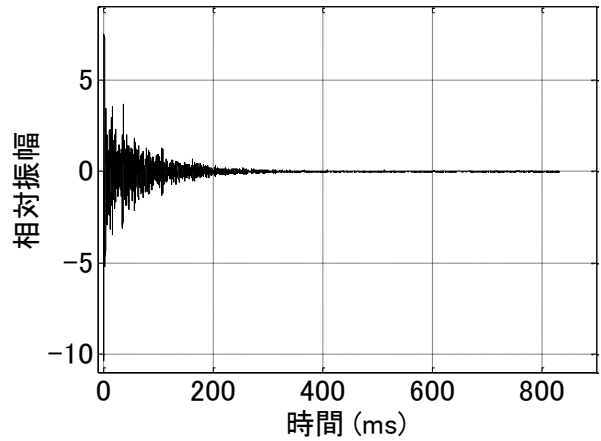


図4 IRの真値波形(750-2250Hz)

#### 4. 帯域別切り出しの検討

WF は平均的な雑音パワーを用いて雑音を抑圧する。従って IR が収束して、雑音のみとなった時間-周波数区間 ( $P_{SN}(n, k)$  に雑音のみしか含まれていない区間) であっても、雑音が平均値よりも大きい場合には式(2)の分子は0とはならず雑音は残ってしまい誤差要因となる。そこで、信号に WF 法を適用したあとに帯域別切り出しを行って誤差の抑圧を行う。

ここで、式(2)の分子項が負値になる場合について考えてみると

$$P_{SN}(n, k) - P_N(k) = P_S(n, k) + \tilde{P}_N(n, k) - P(k) \leq 0 \quad (3)$$

すなわち

$$P_S(n, k) \leq P(k) - \tilde{P}_N(n, k) \quad (4)$$

ただし、 $P_S(n, k)$  は IR の真値、 $\tilde{P}_N(n, k)$  は雑音パワーの時間-周波数瞬時値である。

式(4)は IR の真値が雑音の平均値からの瞬時変動より小さい。言い換えると IR が雑音の変動以下に収束していることを表す。よって本手法では式(2)の分子項が最初に負値となった時刻を IR の切り出し時刻と定めるものとする。次にこの事の妥当性を確認するために行ったシミュレーションについて述べる。

まず、高い SN 比で室内インパルス応答 (残響時間 0.6 秒) を測定し、これを「真値」と考える。次に、これに Hoth 雑音を付加したものを処理対象とした。インパルス応答は窓長 32 のハニング窓を用いシフト長 1 で短時間フーリエ変換を行った。図 4,5,6 にそれぞれ、真値波形、WF を行う前および後の波形を示す。ただし、波形は 750-2250Hz 帯域のサブバンド信号を時間波形に変換して示した。図より、WF 処理前(図 5)に見ら

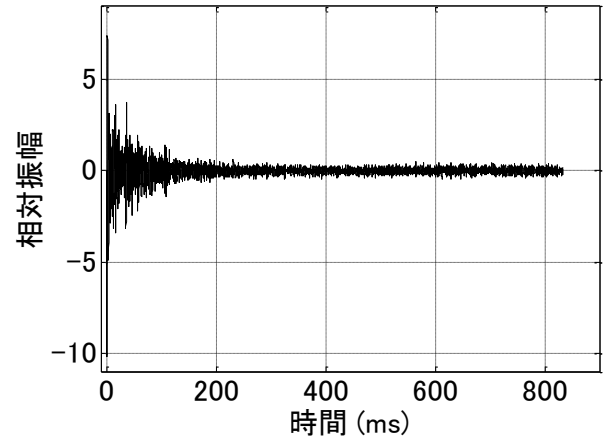


図5 WFを適用する前の750-2250Hz帯域のIR

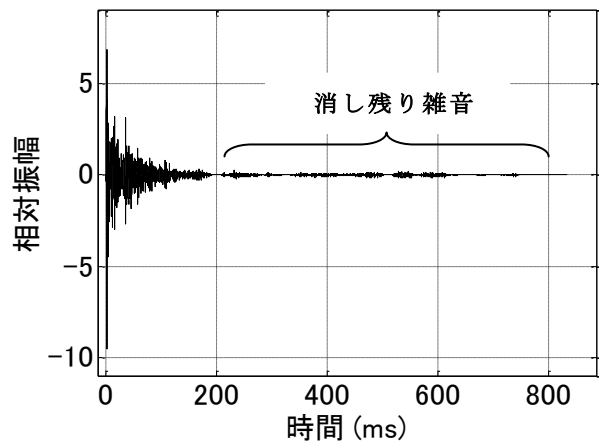


図6 WFを適用した後の750-2250Hz帯域のIR

れた雑音成分は処理後(図 6)において大幅に抑圧されていることがわかるが、消し残り雑音波形が見られる。次に図 6 の波形をさまざまな時刻で切り出した場合

の真値との誤差を計算した。図7は、図6のIRの切り出し時刻 $\tau$ を横軸に、縦軸をその切り出し時刻におけるIR波形誤差 $E(\tau)$

$$E(\tau) = \sum_n (|h(n)| - |\hat{h}(\tau, n)|)^2 / \sum_n |h(n)|^2$$

を表している。ただし、 $h(n)$ 、 $\hat{h}(\tau, n)$ はそれぞれ真値およびWF適用後に切り出したIR波形(750-2250Hz)である。

図より最も誤差が小さかった時刻は式(2)の分子項が最初に負値となる時刻に近い結果となった。また、ほかの周波数帯域についても同じような結果となり、提案する切り出しの時刻の妥当性が確認された。

最後に時間波形で切り出しを行った場合(波形切り出し)との性能比較を行った。シミュレーション条件は同じものとした。波形切り出しをした結果は図2のスペクトログラムの切り出し時刻の左側の部分である。一方、図8に提案法を適用したIRのスペクトログラムを示す。波形切り出し法では切り捨てられていた30ms以降の部分が提案法では保存されている。

次に波形切り出しおよび提案法で得られたインパルス応答をフーリエ変換して周波数振幅特性を求め、真値の周波数振幅特性との誤差を周波数帯域ごとに計算し、その結果を図9の太線と破線に示す。図より提案法の方が3k~12kHzにおいて10dB程度誤差が減少していることがわかる。このことより提案法の有効性を確認することができた。

### 5. 実環境測定の問題点と対策

提案法は定常雑音を前提とするものである。しかし、実環境にはドアの開閉音や歩行音、衝撃音などの非定常雑音が発生する可能性がある。以下ではこの非定常雑音が本手法に及ぼす影響について検討した。

IR測定信号の代表的なものとして掃引正弦波の一つであるTSP信号と擬似雑音の一つであるM系列法が知られている。これら2つの信号を用いた場合の非定常雑音の影響についてシミュレーションを行った。

まず最初にTSP法を用いたシミュレーション結果について述べる。IRはこれまでと同じ室内IRを用いた。このIRをTSP信号とたたみこんでTSP応答を計算し、これに非定常雑音を加算した。非定常雑音としては、別途録音した机を叩く音を用い、そのスペクトログラムを図10に示す。非定常雑音には室内の低周波定常雑音が付加されたものとなっている。そして、TSP応答に非定常雑音を付加した時のスペクトログラムを図11に示す。図において時刻0から直線的に周波数が上昇するTSP応答に、300ms付近で非定常雑音が加算さ

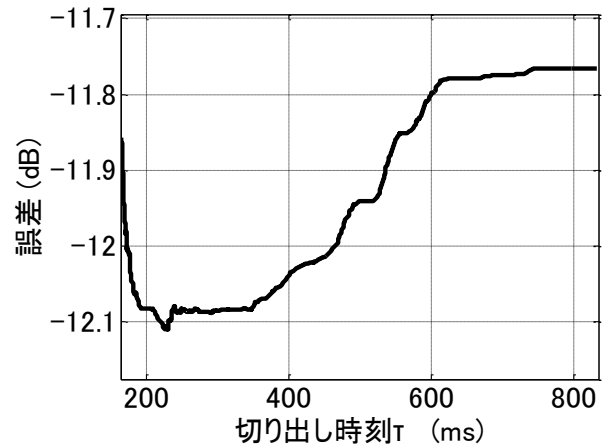


図7 切り出し時刻 $\tau$ とIR波形の誤差 $E(\tau)$

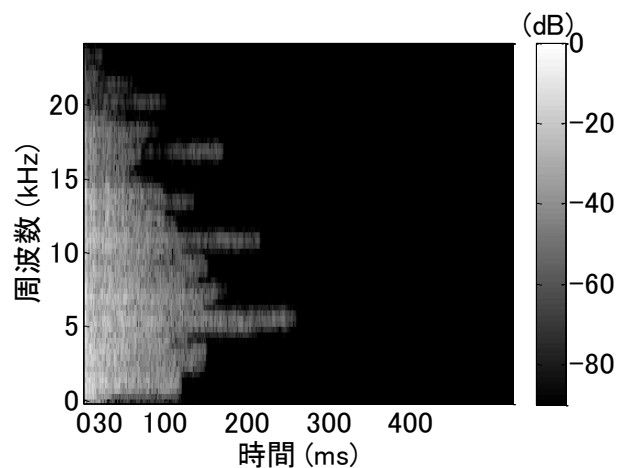


図8 提案法を適用したIRのスペクトログラム

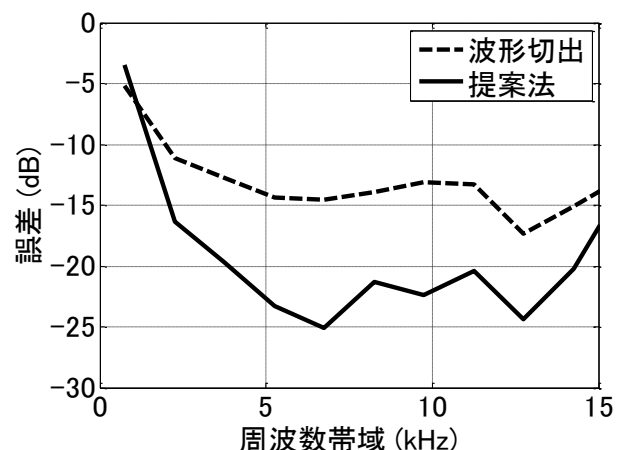


図9 周波数振幅特性の周波数帯域ごとの誤差

れている。次にTSP応答に逆TSP信号を畳み込みIRを求めた。求めたIRのスペクトログラムを図12に示す。図よりTSP法で求めたIRは非定常雑音の影響を

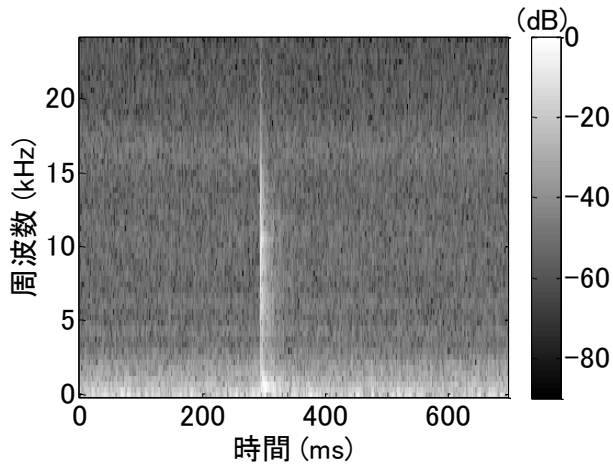


図 10 今回用いた非定常雑音

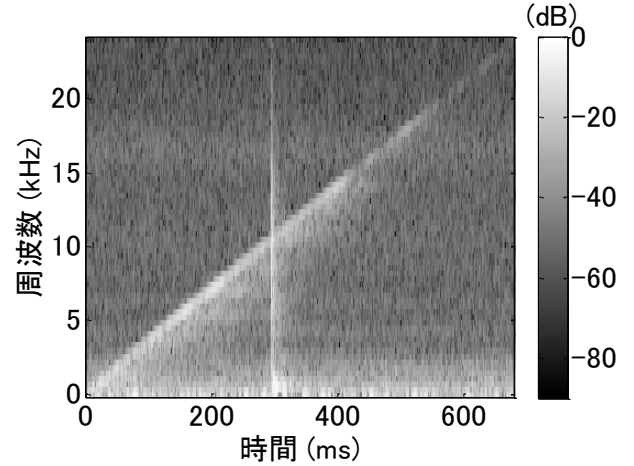


図 11 非定常雑音を付加した TSP 応答

強く受けているということがわかる。

次に図 12 の IR に対して提案法を適用した IR のスペクトログラムを図 13 に示す。図より非定常雑音下では提案法を用いても雑音が抑圧できず大きな誤差が発生していることが分かる。また、WF では IR の存在していない時間区間(たとえば図 12 の 400ms 以降)において定常雑音のパワースペクトル  $P_N(k)$  を推定するが、この区間に非定常雑音が存在すると  $P_N(k)$  が誤推定され、大きな誤差要因となる。

次に M 系列を用いたシミュレーション結果について述べる。シミュレートした M 系列応答に非定常雑音を付加した場合のスペクトログラムを図 14 に示す。図より M 系列応答のスペクトログラムは測定時間全体にランダムに分布していること、および、300ms 付近に非定常雑音が存在することがわかる。次に M 系列応答に逆 M 系列信号を畳み込んで求めた IR のスペクトログラムを図 15 に示す。図より M 系列法で求めた IR においては、非定常雑音が測定時間全体的に拡散して、定常雑音化していることがわかる。

次に図 15 の IR に対して提案法を適用した IR のスペクトログラムを図 16 に示す。非定常雑音が定常化されているので提案法がうまく機能し雑音成分の抑圧ができていたことが分かる。図 17 に図 13 および図 16 の場合の周波数帯域ごとの誤差を示す。図より、非定常雑音の影響を受けていない高周波域では TSP の誤差が小さいが全体としては M 系列法が有利であることが分かる。

以上の結果から実環境において非定常雑音が混入する可能性のある部屋などで測定をする際には M 系列法を用いて測定すれば提案法を有効に使用できるということがわかった。

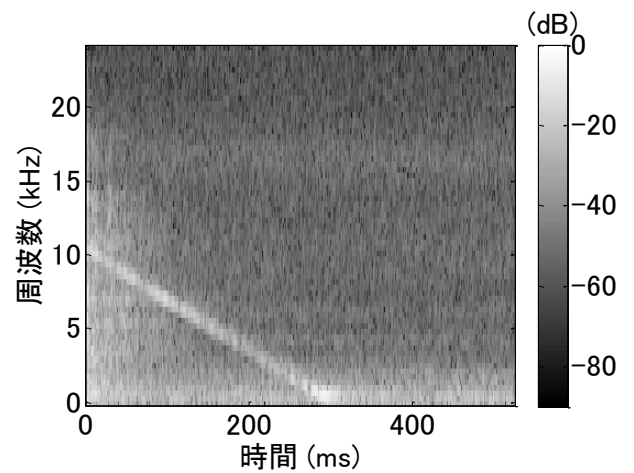


図 12 TSP 法で求めた IR

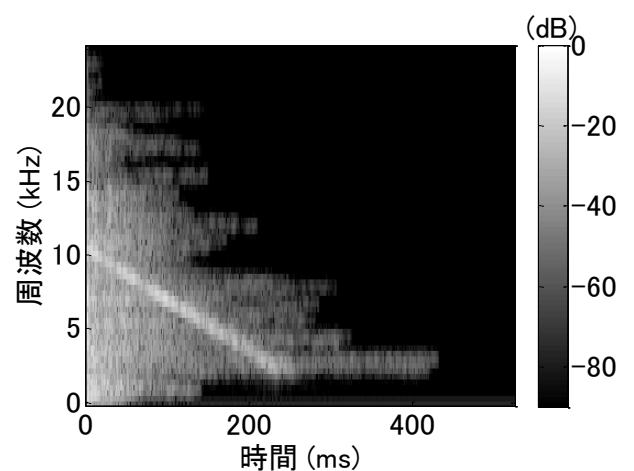


図 13 図 12 の IR に提案法を適用した IR

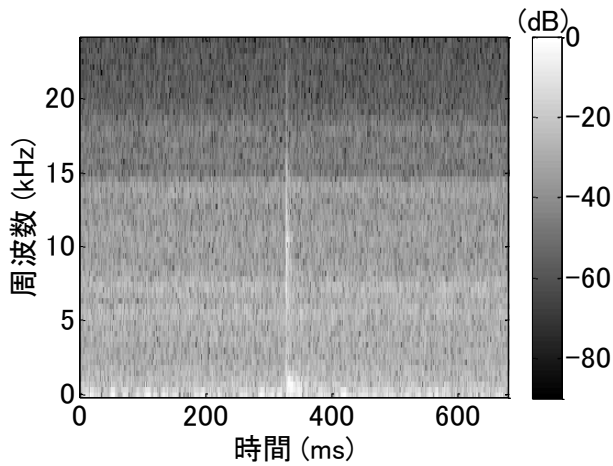


図 14 非定常雑音を付加した M 系列応答

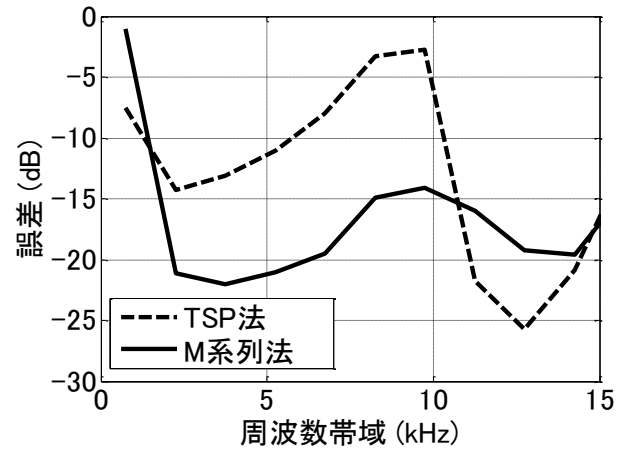


図 17 TSP 法と M 系列法での周波数振幅特性の周波数帯域ごとの誤差

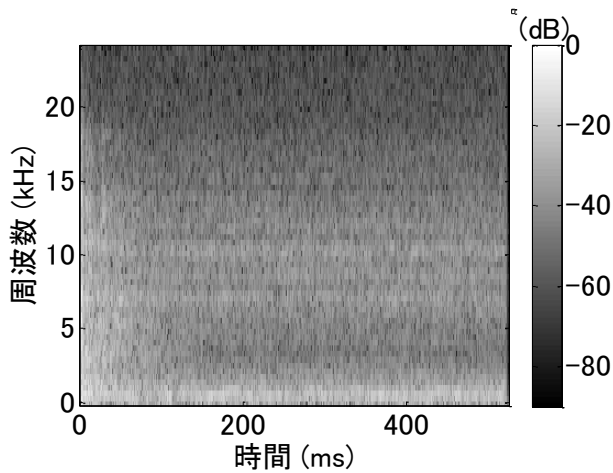


図 15 M 系列法で求めた IR

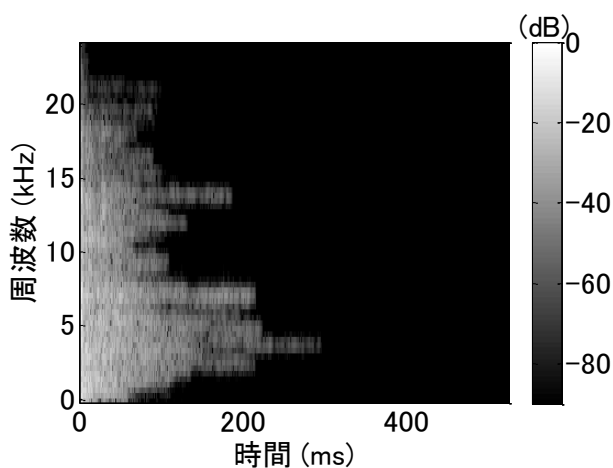


図 16 図 15 の IR に提案法を適用した IR

## 6. むすび

本稿では、計測したインパルス応答 (IR: Impulse Response) に含まれる雑音成分の低減方法として Wiener Filtering (WF) と帯域別切り出しを利用した手法を提案した。WF は通常、残留雑音の問題があることが知られている。そこで、提案法では、帯域分割を行ったインパルス応答に WF を適用した後、出力が最初に零となる時刻 (測定結果の短時間パワーが平均的雑音パワーより小さくなる時刻) 以前の帯域信号を切り出すことで残留雑音の低減を行う。室内 IR を用いたシミュレーションにより、この切り出し時刻の妥当性、および時間波形そのもののある時刻で切り出す方法に対する有効性を示した。

今回提案した方法は定常雑音を前提としているが実環境では非定常雑音の影響を受ける場合も多い。インパルス応答測定信号である TSP と M 系列を比較した結果、非定常雑音環境下では、非定常雑音を定常雑音化する M 系列法が本手法には適していることを示した。

## 文 献

- [1] 橋 秀樹, “室内音響測定の実状と今後の課題,” 日本音響学会誌 49(2), pp.97-102, (1993).
- [2] 落合裕一, 金田豊, “全帯域で SN 比を一定とするインパルス応答測定信号 (CSN-TSP) の実環境における有効性の検討,” 音響学会秋季講演論文集, 3-10-11, pp.621-622, (2010/09).
- [3] L. Faiget, C. Legros, and R. Ruiz, “Optimization of the Impulse Response Length: Application to Noisy and Highly Reverberant Rooms,” J. Audio Eng. Soc, 46, 9, (1998).
- [4] ISO 3382-1:2009(E) pp.8.
- [5] IEEE P269/D9, pp. 80-82, Jan. 2002.
- [6] 浅野 太, “音のアレイ信号処理” pp.48-54, 日本音響学会 (2011).