

信号の保護にもとづく音響システムの測定法の拡張について

信号依存応答とランダム応答計測のための制約の緩和について

河原 英紀[†] 矢田部浩平^{††}

[†] 和歌山大学 〒640-8510 和歌山市栄谷 930

^{††} 東京農工大学 〒640-8510 和歌山市栄谷 930

E-mail: [†]kawahara@wakayama-u.ac.jp, ^{††}yatabe@go.tuat.ac.jp

あらまし 音楽などの信号を保護することにより、インパルス応答、信号依存応答、ランダム応答を測定する方法を提案している。本報告では、先に提案した方法で必要であった条件を緩和し、音楽などの入力信号をほぼそのまま用いることを可能にする。先に提案した方法では、離散フーリエ変換に対応する信号の周期性を厳密に満たすために、ループミュージックの使用あるいは、切断した音楽の断片を繰り返すことが必要であった。ここでは、分割する区間長を十分に長くすることにより、信号の保護という条件を破壊しない範囲で切断した信号の両端を滑らかに整形することにより、周期性を実用上問題ない程度に満たすこととした。実際の音響システムを用いた実験により、提案した方法の実現可能性が示された。定式化による設計法の明確化とツールへの実装は今後の課題である。

キーワード 音響計測、インパルス応答、信号依存応答、ランダム応答、音楽

Extension of a signal safeguarding-based acoustic system measurement method

Reducing requirement for signal-dependent and random response measurement

Hideki KAWAHARA[†] and Kohei YATABE^{††}

[†] Wakayama University, 930 Sakaedani, Wakayama, 640-8510, Japan

^{††} Tokyo University of Agriculture and Technology, 930 Sakaedani, Wakayama, 640-8510, Japan

E-mail: [†]kawahara@wakayama-u.ac.jp, ^{††}yatabe@go.tuat.ac.jp

Abstract We propose an extension of a signal safeguarding-based acoustic measurement method that enables using any sounds, such as music recordings, to test acoustic systems. This article removes restrictions in our previous proposal of a signal safeguarding-based acoustic measurement method. Our previous proposal required strict periodicity in safeguarded test signals because of the periodic nature of discrete Fourier transform. We propose substantially lengthening the test signal segment and smooth-shaping segment edges without deteriorating the safeguarding and practically made segment as a periodic signal. Preliminary tests using an existing acoustic system illustrated the feasibility of the proposed method. Formulation of the method and clarification of the design procedure is the next research topic.

Key words Acoustic measurement, impulse response, signal-dependent response, random response, musical recordings

1. はじめに

音楽などの信号を保護することにより、インパルス応答、信号依存応答、ランダム応答を測定する方法を提案している。本報告では、先に提案した方法 [1], [2] で必要であった条件を緩和し、音楽などの入力信号をほぼそのまま用いることを可能にする。本資料では、緩和に必要なアイデアを簡単な実装を用い

たシミュレーションを通じて説明する。方法の理論的な定式化と、対話的ツールへの実装については、別に報告したい。

2. 信号の保護による音響系の測定：基本

ここでは、先に提案した方法を前回の研究会資料 [2] の一部を再掲して説明する。この説明に基づいて、次の節で緩和に必要なアイデアとそのための拡張内容について説明する。

周期 N の離散周期信号 $\tilde{x}[n]$ を、離散時間の線形時不変システム（インパルス応答を $\tilde{h}[n]$ とする）に入力して得られる出力の離散周期信号を $\tilde{y}[n]$ とする。ここで n は、離散時刻を表し、周期信号であることを明記するために \sim を記号に付すことにする。また、それぞれの離散フーリエ変換を $X[k]$ 、 $H[k]$ 、 $Y[k]$ と表すことにする。ここで k は、離散周波数を表す。こうして定義した、 $X[k]$ 、と $Y[k]$ を用いて $H[k]$ を次のように表すことができる。

$$H[k] = \frac{Y[k]}{X[k]}. \quad (1)$$

音楽などの実際のコンテンツは、次のような場合、周期信号として扱うことができる。一つは、信号の前後にインパルス応答の（実質的な）長さ以上の長さの無音区間を接続した場合である。このように加工した信号の始端と終端を接続して周期信号としてインパルス応答と畳み込んだ信号は、周期信号となる。

もう一つは、ループミュージックのように同一の単位を複数回（例えば L 回）繰り返すとき、インパルス応答の（実質的な）長さが繰り返しの単位よりも短い場合である。この場合には、二回目の繰り返し以降は、繰り返しの終端と二回目の始端を接続することで、 $L-1$ 個の周期信号として扱うことができる。

このような状況では、式 4 を用いて入力信号と出力の観測結果から線形時不変応答に対応する $H[k]$ を求めることができる。ただし、実際には観測に伴う雑音が存在するため、 $|X[k]|$ が小さい場合には、求められる $H[k]$ に大きな誤差が含まれる。

2.1 信号の保護

$|X[k]|$ が小さいことで問題が生じているのであるから、 $|X[k]|$ が小さくなることを防げば良い。例えば $|X[k]|$ がある閾値 θ_L よりも小さくならないようにすれば良い。具体的には、次のようにして信号を加工する¹⁾。

$$X_s[k] = \begin{cases} \frac{\theta_L X[k]}{|X[k]|} & \text{for } 0 < |X[k]| < \theta_L \\ X[k] & \theta_L \leq |X[k]| \end{cases}, \quad (2)$$

ここで、もし $X[k] = 0$ となる場合には、 $X_s[k] = \theta_L$ とする。

$X_s[k]$ を離散逆フーリエ変換 $\mathcal{F}^{-1}[\cdot]$ することで、信号 $\tilde{x}_s[n]$ を得る。このようにして処理された信号を、以下では保護された信号（safeguarded signal）と呼ぶことにする。

$$\tilde{x}_s[n] = \mathcal{F}^{-1}[X_s[k]]. \quad (3)$$

保護された信号 $\tilde{x}_s[n]$ を対象とするシステムに入力して得られた出力を $\tilde{y}_s[n]$ と表し、その離散フーリエ変換を $Y_s[k]$ と表すことにし、保護されたインパルス応答の離散フーリエ変換 $H_s[k]$ を次式で求める。

$$H_s[k] = \frac{Y_s[k]}{X_s[k]}. \quad (4)$$

2.2 ランダムおよび時変成分の分離

観測雑音 $d[n]$ が存在するときには、保護された特性には観測雑音による影響 $D[k]$ が加わる。観測雑音は観測毎に独立で

あると仮定し、次式により保護された時不変応答 $H_{sTI}[k]$ と、観測雑音による影響 $|D_{sTV}[k]|^2$ を M 回の観測に基づいて求めることにする。

$$H_{sTI}[k] = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M H_s^{\{n_m\}}[k] \quad (5)$$

$$|D_{sTV}[k]|^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^M \left| H_s^{\{n_m\}}[k] - H_{sTI}[k] \right|^2, \quad (6)$$

ここで $\{n_m\}$ は、異なった観測を区別するための指標である。

実際の音響システムでは、スピーカーを保護するメッシュスクリーンやバスレフのポートの気流などによる乱流雑音、室内の微風などの空気の流れによる位相変調などにより、信号に依存するランダム成分が発生することがある。ここで求められる観測雑音による影響 $|D_{sTV}[k]|^2$ には、これら（信号に依存するランダム成分）も含まれている。さらにスピーカーのボイスコイルの温度上昇によるシステムの感度変化があった場合、その影響も含まれる。

2.3 信号依存時不変成分の分離

対象となる音響システムに非線形性が含まれている場合、信号に依存した成分が発生する。この成分はランダムではないので、前の節の処理では取り除かれない。まず、同じ周期を有する異なった周期信号の集合 $\Omega_P = \{\tilde{x}_s^{\{p\}}[n] \mid p = 1, \dots, P\}$ を考える。 p は、異なった周期信号を区別するための指標である。ここで、 p 番目の周期信号を用いて（例えば前の節での平均により）求められた保護された特性を $H_s^{\{p\}}[k]$ と表すことにする。異なった周期信号により生ずる信号に依存する応答は、相互に独立であると仮定する。それらを用いて、保護された線形時不変応答 $H_{sLTI}[k]$ と、信号に依存する成分による影響 $|H_{sSDR}[k]|^2$ を次式により求める。

$$H_{sLTI}[k] = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P H_s^{\{p\}}[k] \quad (7)$$

$$|H_{sSDR}[k]|^2 = \frac{1}{P-1} \sum_{p=1}^P \left| H_s^{\{p\}}[k] - H_{sLTI}[k] \right|^2. \quad (8)$$

3. 信号の保護による音響系の測定：制約の緩和

この提案した方法の最も重要な条件は、信号の離散フーリエ変換の絶対値が小さくなり過ぎないように閾値を設定して底上げをすることにある。その際、切り出した信号を周期信号であるとみなすことで、切断の影響を無視することを可能にしている。このようにすることで、それぞれの区間を独立に扱い、異なる信号から求められたインパルス応答の違いから（システムの非線形性に主に起因する）信号依存応答を求め、同じ信号の繰り返しから求められたインパルス応答の違いから（システムの時間変化や、暗騒音、システムのランダム変動に起因する）ランダムあるいは時変応答を求めていた。以前の提案では、この独立性を厳密に保証するために、ループミュージックあるいは、元の音楽を切断したものを繰り返すという制約が生じていた。

ここでは、信号の保護のポイントである「離散フーリエ変換の絶対値が小さくなり過ぎないようにする」を大きく劣化させ

(注1)：これは一例である。 $|X[k]| \geq \theta_L$ であれば良いので、 $X[k] = \theta_L e^{j\varphi}$ としても良い。ここで $j = \sqrt{-1}$ であり φ は $[0, 2\pi)$ に一様分布する乱数である

ない範囲でこれらの制約を緩和する。切断した区間の両端において信号が滑らかに0に近づくようにすることで、同一区間を周期的に繰り返した信号から周期の長さで信号を切り出さなくとも、切断した信号を周期信号と見なすことができる。また、切断する区間の長さをシステムのインパルス応答の（パワーに基づく）持続時間よりも十分に大きくすると、切断された前の区間により生ずるシステムの応答の影響を無視することができる。このような区間に、例えば音楽信号を分割し、それぞれの区間の信号を（周期信号であるとみなして）信号を保護し、それらを接続したものを測定用信号とすれば良い。分析の際には、区間の位置合をした後に、試験信号と測定されたシステムの出力を切り出し、両端が滑らかになるように整形した後、それぞれからインパルス応答を求め、平均を線形時不変応答とし、それぞれの区間で求められた応答と線形時不変応答との差（の二乗平均値）を、測定時におけるシステムの線形時不変応答からの逸脱として求めれば良い。

さらに、こうして用意した（近似的な方法により保護された）試験信号を複数回再生することで、逸脱を、システムの信号依存応答と、ランダムおよび時変応答とに分離することができる。以上が、緩和の概要である。このような方法で求めた線形時不変応答を用いることで、整形の影響を補償し、解を改良できる可能性がある。この可能性については、別の機会に検討したい。

3.1 切断と整形による信号の保護への影響

ここでは、具体的な音楽信号を例として、信号の区間への分割および整形と、切断された信号の保護への影響を調べる。音楽信号としては、RWC 研究用音楽データベース [3] に収録されている曲（Prologue）を用いた。

図 1 に、閾値を周波数依存として作成した保護信号と整形の影響、を示す。ここで青は保護されていない信号の離散フーリエ変換の絶対値、赤は保護された信号の離散フーリエ変換の絶対値を示す。図の赤が覆っている部分の下には青がある。ここで、閾値は、当該の周波数の $\pm 1/6$ オクターブに含まれる成分の絶対値の二乗平均から -10 dB としている。(a) は、厳密な実装によるもの、(b) は、切断区間の両端を 5 ms 幅で滑らかに整形したもの、(c) は、50 ms で整形したものである。整形には、6 次の余弦級数 [4] を用いた。(b) では厳密な実装とほとんど変わらないが、(c) では、赤線で表現されたものに極端に値が小さいものが認められる。以下では、整形の幅を 5 ms として検討を行う。なお、ここでは切断の区間長を $2^{18} = 262144$ サンプルとしている。用いた標準化周波数 44100 Hz では 5.94 秒に相当する。

図 2 に、信号の保護によって等価的に生ずる雑音の離散フーリエ変換の絶対値を併せてしめす。信号のスペクトル形状に類似しているため、目立たない音色の雑音になっている。静かな場所での再生では、この雑音ははっきりと聞こえるが、コンサートなどの休憩時間での測定のような状況では、暗騒音に埋もれる程度のレベルである。

4. 測定例

前節での検討により、整形の幅を 5 ms とすることで、信号の保護を保ったまま、単に切断した試験信号と収録されたシステ

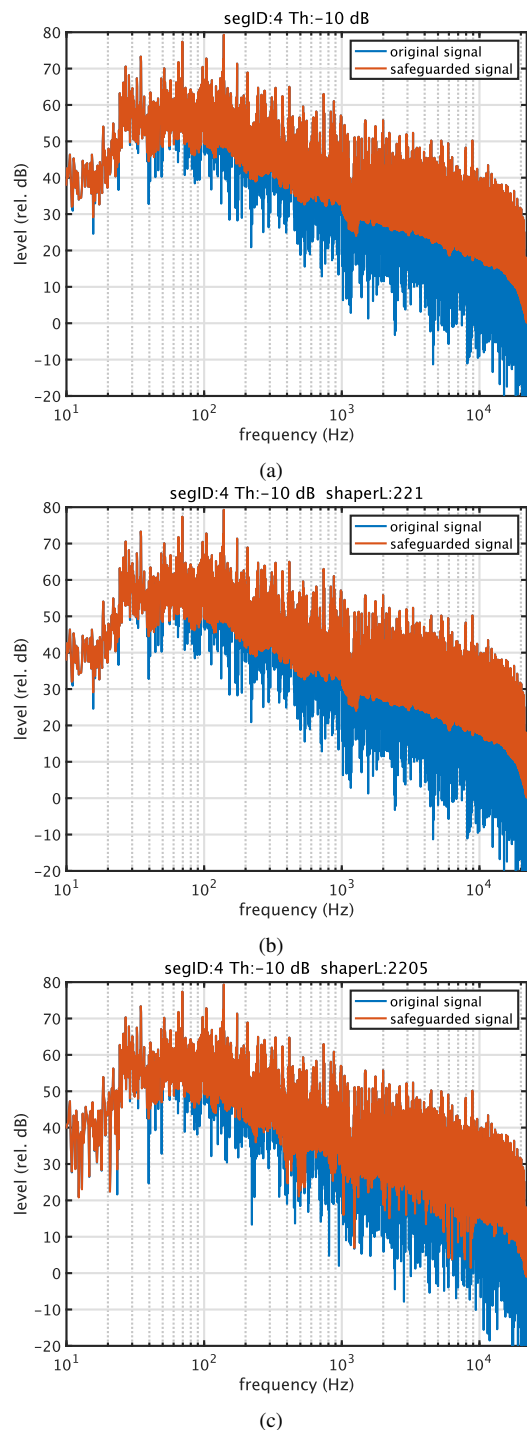


図 1 Absolute values of discrete Fourier transform representations. The blue line in each plot represents the original value. The red line represents the safeguarded ones. (a) Strict implementation, (b) Edge shaping with 5 ms transition, and (c) Edge shaping with 50 ms transition.

ムの応答の離散フーリエ変換の比を求めることで、線形時不変システムに対応するインパルス応答を求めることができる可能性が示された。ここでは、実際の音響システムを用いて、この方法の実現可能性を調べる。

4.1 測定対象とするシステム

測定に用いた機器を以下に示す。

マイクロフォン Earthworks M50、全指向性 1/8 インチ コンデ

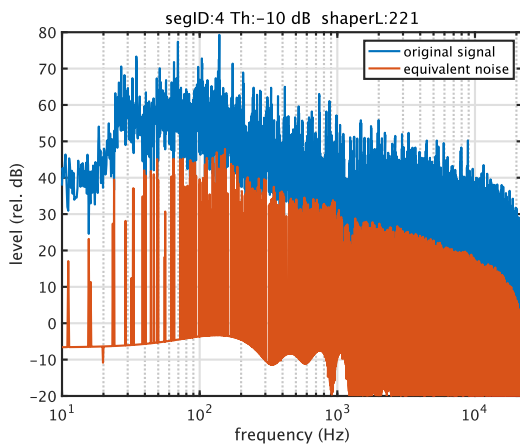


図2 Absolute values of discrete Fourier transform representations. The blue line in each plot represents the original value. The red line represents the values of equivalent noise generated by safeguarding. This shows the results with edge shaping.

ンサマイクロフォン。50 kHz まで± 1 dB 以下の平坦な特性。
 スピーカ IK Multimedia iLoud Micro Monitor。小型のモニター用パワードスピーカ。

騒音計 CUSTOM SL-1340U, IEC 61672-1 Class2 準拠
 オーディオインタフェース PreSonus STUDIO 2|6 USB
 収録用システム Apple PowerBookPro 14" M1 Max 64GB。
 再生、収録用アプリケーション 再生: QuickTime Player。収録: Amadeus Pro。

測定は、郊外の住宅街にある家屋の約 7 m² の和室で主に行った。この和室は約 25 m² のリビングに隣接しており、襖を開放することで約 3 m² の開口部で接続されている。前の節で触れたような状況を想定し、通常の生活騒音がある状態で測定している。今回は結果を見やすくするために、マイクロフォンをスピーカの前 22 cm に設置した。

図3に、前回の研究会で報告したツールを用いて測定した今回対象とするシステムの応答を示す。マイクロフォンとスピーカとの関係など、以下の測定と同じ条件としている。

4.2 信号の再生と収録

1 kHz を中心とする帯域雑音を用いて、較正用の信号を記録した。同じ設定で QuickTime Player から測定用のモノラルの試験信号を左右両チャンネルから同時に再生した。左チャンネルの出力はスピーカに接続され、オーディオインタフェースの左チャンネルには、収録用のマイクロフォンを接続した。右チャンネルの出力は、オーディオインタフェースの右チャンネルに接続した。

今回は、試験信号を3回再生し、収録された信号とループバックされた信号を同時に記録した。なお、最初の再生では、実験者の動作により、収録中にマイクが揺れる場面があった。

4.3 信号の整列と分析

まず、ループバックされた信号を用いて、最初の区間分の試験信号との相関をとることで、時間軸を整合させた。その後、48 個の区間から構成される試験信号と収録された信号から、両端を処理した後にそれぞれの離散フーリエ変換の比として線形時不変成分の周波数応答を求め、インパルス応答を求めた。

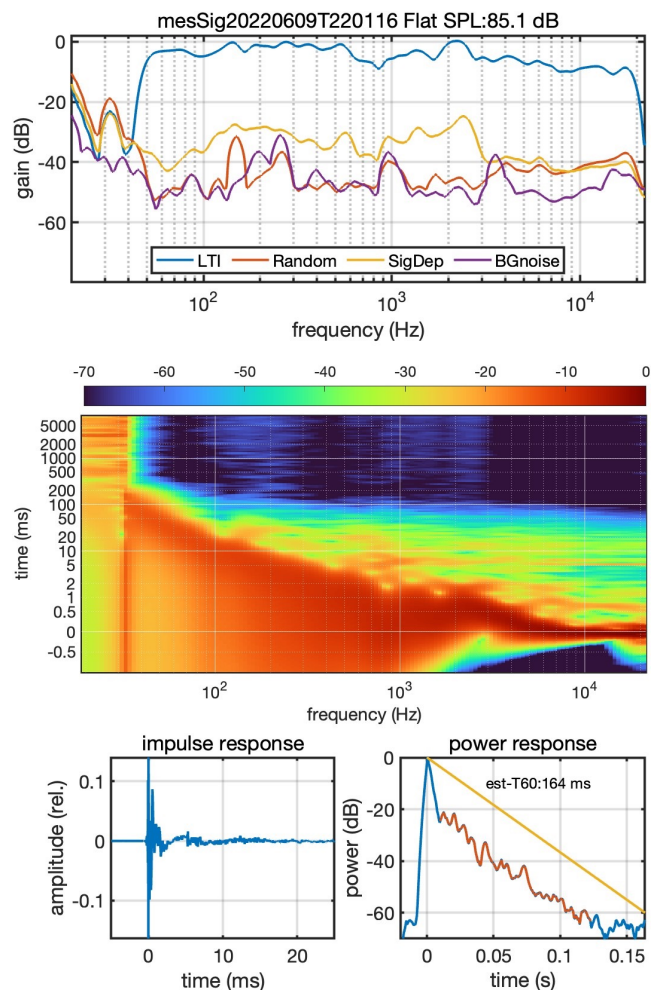


図3 Measurement results of the tested system. This measurement used the acoustic measurement tool based on signal safeguarding [2].

図4に、平均として求められた線形時不変システムに対応するインパルス応答を(a)に示す。(b)には、平均する前の一回の測定結果を併せて示す。48回の平均により、暗騒音などに起因するランダムな成分のレベルが低下している。この測定結果と、前回報告したツールを用いた測定結果である図3とを比較すると、同一であることが分かる。

図5に周波数応答を示す。(a)は、測定結果をそのまま表示している。(b)は、ツールと同様に、1/3オクターブ幅で平滑化したものである。(c)は、二つの測定の間に対応する区間毎の差から求められたランダムおよび時変応答を加えて表示している。(b)の結果は、図3の最上段に表示されている周波数応答とほとんど同じである。これらの結果は、本資料で提案した音楽などの信号を、ほぼそのまま用いて音響特性を測定する方法の実現可能性を示すものである。

5. おわりに

ここでは、以前に提案した音楽などを用いて音響システムを測定する方法にあった制約を緩和する方法について紹介した。ここで紹介した方法を用いることで、以前の方法が必要であった、ループミュージックの使用や、そうでない場合には、切断した区間の繰り返しという制約を外し、音楽全体を、ほぼその

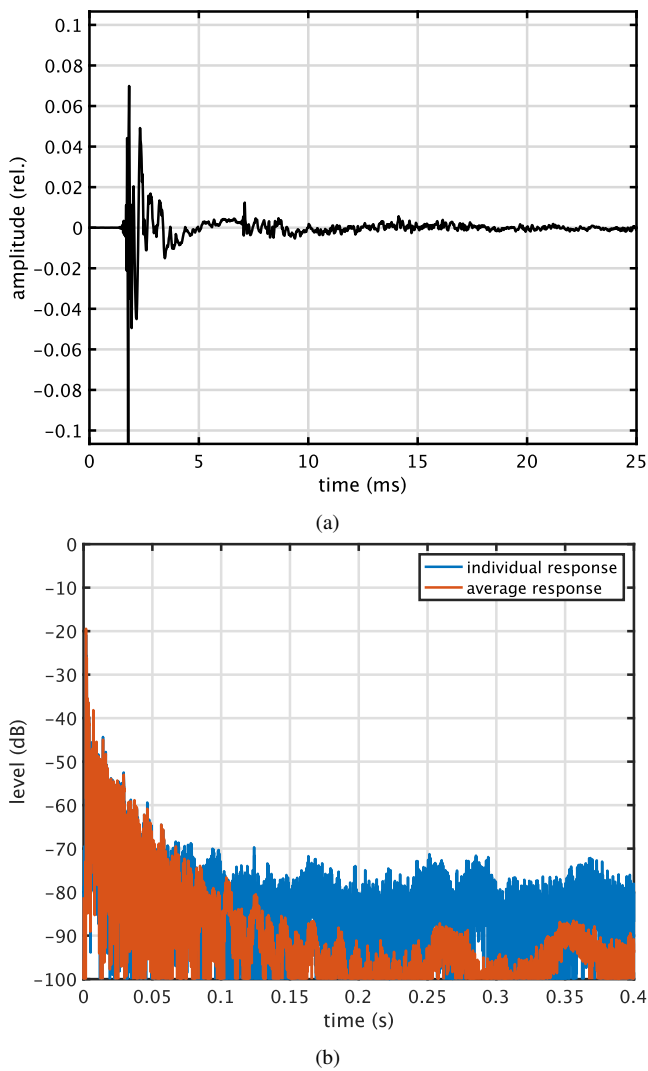


図4 Average impulse response and individual responses. (a) shows the average impulse response and (b) shows dB representations of the average and an example individual response.

まま用いることができる。本資料では、方法の背景にあるアイデアを簡単に説明し、実際の音響システムを用いて収録した信号により、提案した方法の実現可能性を示した。ここで提案した方法の定式化と設計手順の明確化を行い、測定用のツールとして実装することは今後の課題である。

謝 辞

本研究は科研費 18K00147, 18K10708, 19K21618, 21H04900 の支援を受けた。

文 献

- [1] H. Kawahara and K. Yatabe, "Safeguarding test signals for acoustic measurement using arbitrary sounds: Measuring impulse response by playing music," *Acoustical Science and Technology*, vol.43, no.3, pp.209–212, 2022.
- [2] 河原英紀, 矢田部浩平, 榊原健一, 水町光徳, 北村達也, "音楽およびさまざまな音響コンテンツを用いた音響システム計測用ツールの試作について," *音声言語情報処理研究会*, vol.2022-SLP-140, no.14, pp.1–8, 2022.
- [3] 後藤真孝, 橋口博樹, 西村拓一, 岡隆一他, "Rwc 研究用音楽データベース: 研究目的で利用可能な著作権処理済み楽曲・楽器音データベース," *情報処理学会論文誌*, vol.45, no.3, pp.728–738,

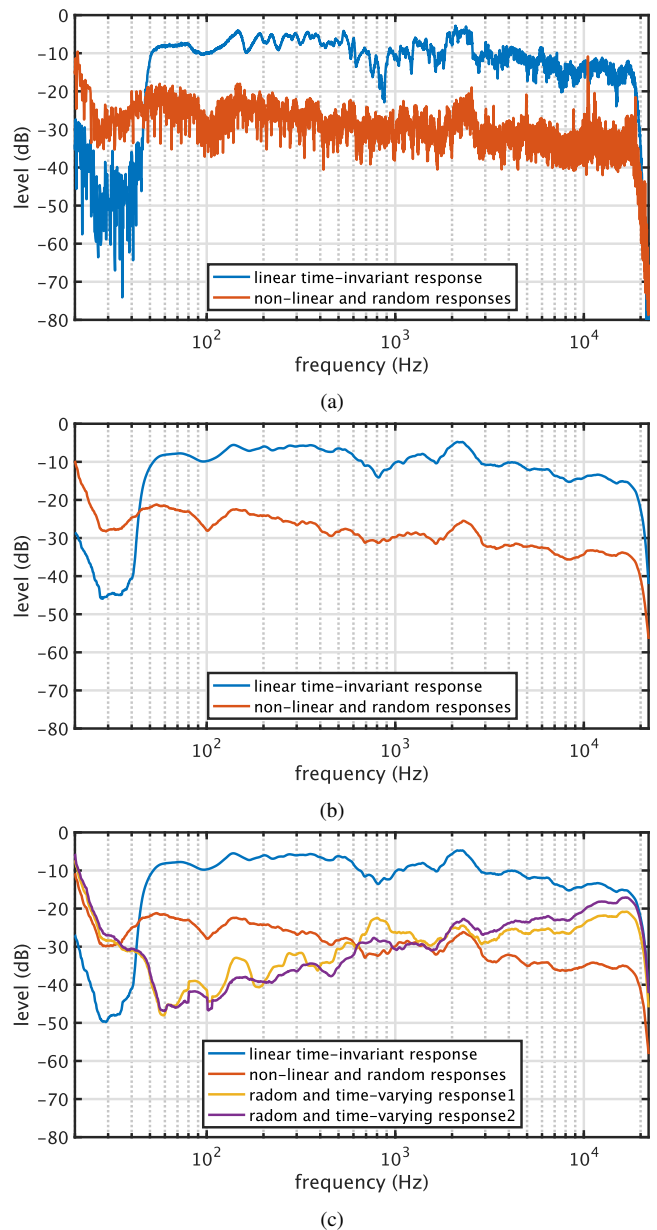


図5 Frequency responses of the linear time-invariant system and the mixture of non-linear related and random responses. (a) Shows the raw measurement results, (b) shows results using 1/3 octave smoothing, and (c) shows random and time-varying responses derived from two pairs of measurements

2004.

- [4] H. Kawahara, K. Sakakibara, M. Morise, H. Banno, T. Toda, and T. Irino, "A new cosine series antialiasing function and its application to aliasing-free glottal source models for speech and singing synthesis," *Proc. Interspeech 2017*, pp.1358–1362, Stocholm, Aug. 2017.