

インパルス応答測定結果の帯域別雑音レベルを一定とする効率的な残響時間測定法*

中原 優樹*¹ 金田 豊*¹

【要旨】 残響時間の測定方法は ISO 3382 に規定されており、音場のインパルス応答から求められるが、その際、広い周波数帯域で低雑音レベルであることが要求される。従来のインパルス応答測定信号を用いた場合、環境雑音や、被測定系の周波数特性の影響で、帯域ごとの雑音レベルは大きく異なり、要求雑音レベルの実現のために時間的に非効率的な測定が必要であった。これに対し本報告では、インパルス応答測定信号として、測定結果の SN 比を帯域ごとに制御できる信号を用いた測定方法を提案する。この方法は、全対象帯域において要求雑音レベルの上限値を持つ測定結果を行うことで、残響時間測定品質を保証し、測定時間の短縮が図れることを示した。

キーワード 残響時間, インパルス応答, 掃引正弦波信号, CSN-SS

Reverberation time, Impulse response, Swept sine signal, CSN-SS

1. はじめに

残響時間は室内の音の響きの長さを表したもので、建築音響の分野における代表的な音響指標である。この残響時間を測定する際の方法と要求条件は ISO 3382 [1] に規定されており、対象となる室内音響系のインパルス応答から算出することができる。しかし、実環境において音響インパルス応答を測定する際には、雑音等の影響により信号対雑音比（以下、SN 比）が低下し測定誤差が生じてしまう。この問題を解決するために、様々なインパルス応答測定用の信号が提案されている。

測定信号の中で最も代表的なものとして Time Stretched Pulse (TSP) 信号 [2, 3] が挙げられる。TSP 信号は、時間に比例して周波数が上昇（又は下降）するような掃引正弦波信号であり白色スペクトルを持つ。同様に白色スペクトルを持つ測定信号としては M 系列信号が知られている [4, 5]。

もう一つの代表的測定信号としては Logarithmic Swept Sine (Log-SS, 又はピンク TSP, 又は Exponentially Swept Sine: ESS) 信号が挙げられる [6, 7]。この信号は $1/f$ 特性のパワースペクトルを持った測定信号であり、低域成分のエネルギーが大きいといった特徴を持つ。そのため室内騒音など低域に大きなエネ

ルギーを持つような騒音環境下での SN 比の改善に効果的である。

また、TSP 信号や Log-SS 信号が固定的なスペクトルを持った信号であるのに対して、測定環境の雑音スペクトルに適応して、より大きい雑音低減効果を持つ信号が提案されている。Minimum Noise Swept Sine (MN-SS) 信号 [8] はその一つで、予備測定した環境雑音のパワースペクトル $P_N(f)$ に対し $\sqrt{P_N(f)}$ のパワースペクトルを持ち、測定結果に含まれる雑音成分のエネルギーを最小化するという特徴を持つ。

本研究の目的である残響時間測定においては、測定対象となる帯域のすべてでインパルス応答に対する雑音レベルが要求条件以下であることが求められている。しかし上記した従来の測定信号では、全帯域の総和としての雑音エネルギーは低減できても、各帯域の雑音レベルは異なった値となる。その結果、特定の帯域で雑音レベルが大きくなって要求条件を満たさなくなる場合があり、その雑音レベルを低減するためには、信号長を増大することが必要となる。従って、全帯域において一定の雑音レベルでの測定を実現する信号が望まれる。

筆者らは近年、測定環境における雑音スペクトルと被測定系の大まかな特性とを予備測定して、測定結果の帯域ごとの SN 比を一定とする Constant Signal-to-Noise ratio Swept Sine (CSN-SS) 信号を提案した [9, 10]。しかし、帯域ごとの SN 比と雑音レベルは等価なものではないので、既存の CSN-SS 信号測定法を残響時間測定に直接適用することはできない。

本研究では、従来の CSN-SS 信号の原理を拡張して、

* Effective reverberation time measurement method by controlling background-noise levels in measured impulse response,
by Yuki Nakahara and Yutaka Kaneda.

*¹ 東京電機大学工学研究科
(問合先: 金田 豊 e-mail: kaneda@c.dendai.ac.jp)
(2015 年 11 月 9 日受付, 2016 年 1 月 4 日採録決定)

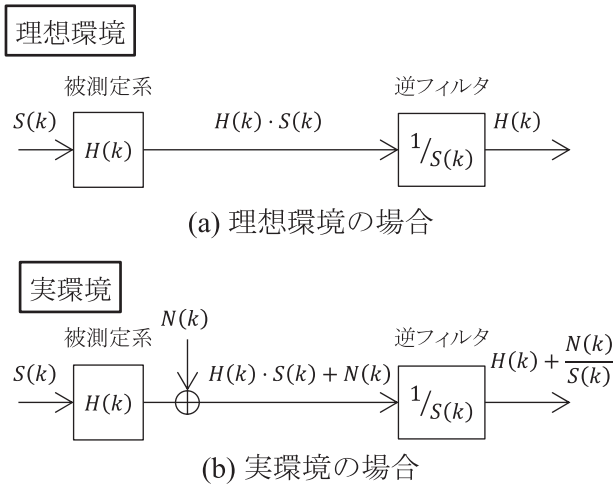


図-1 インパルス応答測定の原理

各帯域の雑音レベルを個別に制御することを可能とした。そしてその結果、測定対象となる帯域のすべてで、雑音レベルを一定値（要求条件の上限値）とする測定信号を合成した。この信号を用いることで、残響時間測定の品質が保証され、測定の短時間化、効率化が図れたことについて報告する。

以下、第2章ではインパルス応答測定原理について概説する。次に、第3章では拡張したCSN-SS信号を用いることでインパルス応答の測定結果の帯域別雑音レベルを一定化できることを述べ、CSN-SS信号を用いた効率的な残響時間測定方法を提案する。第4章では実音場実験によって提案方法の有効性を確認し、第5章ではシミュレーションにより多様な雑音条件についての検証を行う。最後に第6章でまとめを述べる。

2. インパルス応答測定原理と従来法の問題点

2.1 インパルス応答測定原理

線形系のインパルス応答をフーリエ変換すると、その系の周波数応答特性（以下周波数特性と略称）が得られる。また、周波数特性を逆フーリエ変換するとインパルス応答が得られる。このように、インパルス応答と周波数特性とは等価量であるが、周波数帯域ごとのSN比を考える場合には周波数特性で説明したほうが分かり易いので、以下の説明では「インパルス応答測定」ではなく「周波数特性測定」として説明する。

図-1(a)は、雑音のない理想環境で測定信号 $S(k)$ を用いて被測定系の周波数特性を測定する原理を表している。ただし、 k は離散周波数番号を示す。図において周波数特性 $H(k)$ を持つ被測定系に信号 $S(k)$ を入力した場合の応答は $H(k) \cdot S(k)$ となり、これに逆フィルタ $1/S(k)$ をかけることで周波数特性 $H(k)$ を得ることができる。

しかし実環境においては、図-1(b)に示すように、系

の応答に雑音（室内騒音や電氣的雑音等） $N(k)$ が付加され $H(k) \cdot S(k) + N(k)$ となる。この応答に逆フィルタ $1/S(k)$ をかけると、測定結果には $H(k)$ に加えて $N(k)/S(k)$ と表される雑音成分が含まれる。以下、測定系において付加される不要成分 $N(k)$ を「雑音」、逆フィルタをかけた後の測定結果に含まれる不要成分 $N(k)/S(k)$ を「雑音成分」と呼んで区別する。

このことから分かるように測定結果に含まれる雑音成分の大きさは環境雑音のスペクトル $N(k)$ と測定信号のスペクトル $S(k)$ によって決定される。また、測定信号の信号長 L を増大させた場合、雑音成分 $N(k)/S(k)$ のエネルギーは、分子と分母のエネルギーがともに L に比例して増加するため、 L によらず一定となる。一方で雑音成分のパワーは一定のエネルギーを信号長 L で除したものとなる。そのため、測定信号のスペクトル形状が同じであれば、インパルス応答波形に含まれる雑音成分のパワー（単位時間当たりの雑音成分エネルギー）の大きさは測定信号長に反比例する[11]。

2.2 インパルス応答の帯域別雑音レベル

残響時間を求める場合、インパルス応答をオクターブバンド又は $1/3$ オクターブバンドの帯域通過フィルタに通すことで帯域別インパルス応答を求め、残響時間はその二乗逆積分曲線の傾きより算出される。このとき、インパルス応答の帯域別雑音レベルは、帯域別インパルス応答の最大音圧レベルを基準とした雑音成分の平均パワーレベルとして定義される。図-2にTSP信号を用いて測定した帯域別インパルス応答の短時間パワー特性の例を示し、破線で帯域別雑音レベル（以下雑音レベルと略称）を示す。

ここで、周波数帯域 p で帯域制限したインパルス応答を $h_p(n)$ 、それに含まれる雑音成分を $n_p(n)$ と表す。ただし n は離散時間を表す。このとき、帯域別の雑音レベル NFL_p は次式で表される。

$$NFL_p = 10 \cdot \log_{10} \left\{ \frac{\text{mean}(n_p^2(n))}{\max(h_p^2(n))} \right\} \quad (1)$$

式(1)より帯域ごとの雑音成分のパワーと、帯域ごとのインパルス応答の最大値の両方が雑音レベルに影響することが分かる。例えば、被測定系の応答には測定に用いられる音響機器の特性が含まれており、音響機器の出力が低下する帯域では $h_p^2(n)$ は小さくなって雑音レベルが上昇する。

また、雑音成分のパワー $\text{mean}(n_p^2(n))$ は、2.1節に述べたように、測定信号長に反比例するので、測定信号長を伸縮することで雑音レベルの大きさを制御することができる。

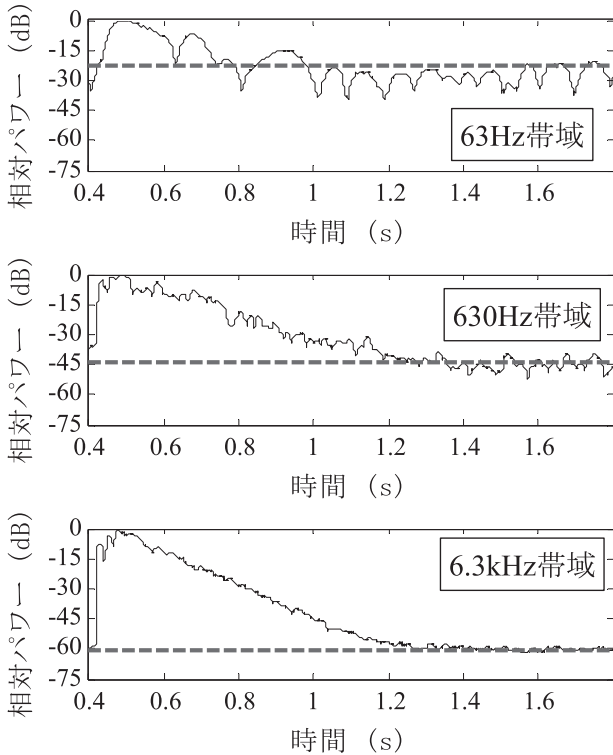


図-2 TSP 信号を用いて測定した帯域別インパルス応答の短時間パワー特性の例 (破線はそれぞれの雑音レベルを示す)

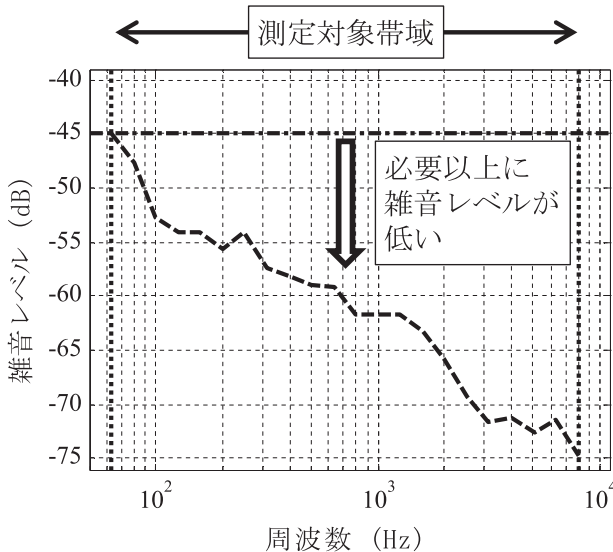


図-3 TSP 信号を用いたときの測定結果の帯域別雑音レベルの例

2.3 従来信号を用いたときの問題点と研究目的

実環境における帯域別雑音成分 $n_p(n)$, 及び帯域別インパルス応答 $h_p(n)$ の大きさは, 帯域ごとに異なる。そのため, 従来の測定信号 (TSP 信号, Log-SS 信号や MN-SS 信号など) を用いた場合には, 測定結果の雑音レベル NFL_p は図-2 の各図の破線に示すように帯域ごとに異なって得られる。(図-2 において 63 Hz 帯域の雑音レベルは約 -20 dB であるのに対し, 6.3 kHz 帯域では約 -60 dB となっている)

また, 図-3 に TSP 信号を用いたときの 63 Hz~8 kHz

の 1/3 オクターブバンドの測定結果に含まれる雑音レベルの例を示す。残響時間測定においては, 対象とする帯域内 (図-3 に縦破線で示す帯域) すべてにおいて雑音レベルが -45 dB 以下であることが求められる (ISO 3382, T_{30} 測定時)。従来の測定信号を用いてこの要求条件を満たすように測定すると, 図-3 に示すように, 雑音レベルが最大 (-45 dB) の帯域以外では雑音レベルが必要以上に低くなる。

掃引正弦波を利用した場合, 帯域ごとの掃引時間は帯域ごとの雑音レベルに反比例するので, 必要以上に雑音レベルが低いことは必要以上に掃引時間が大きいことを意味している。その結果, 測定時間が増大するという問題が発生する。

これに対し, 測定結果の雑音レベルを -45 dB で一定とするような測定が実現されれば, 無駄な掃引時間をかけない必要最小限の時間での測定であると言える。本研究では帯域ごとの雑音レベルが一定となるような測定信号を提案し, この問題の解決を試みる。

3. CSN-SS 信号を用いた残響時間測定法

3.1 従来の CSN-SS 信号の測定原理

筆者らが以前提案した CSN-SS 信号 [9,10] は, 周波数によらず SN 比が一定となる周波数特性の測定を実現する信号である。最初にその原理を述べる。

図-1(b) に示すように信号 $S(k)$ を用いて測定された周波数特性 $H(k)$ には, 雑音成分 $N(k)/S(k)$ が含まれる。従って, 測定結果の周波数ごとの SN 比は, それらのパワー比として,

$$SN(k) = \frac{|H(k)|^2}{P_N(k)/|S(k)|^2} \tag{2}$$

と表される。ただし, $P_N(k)$ は雑音 $N(k)$ のパワースペクトルを表す。

このとき, 周波数によらず SN 比を一定するためには,

$$SN(k) = C \quad (C \text{ は定数}) \tag{3}$$

を満たす信号を用いればよい。そこで式 (2) の $SN(k)$ に式 (3) を代入して信号のパワースペクトル $|S(k)|^2$ について解くと

$$|S(k)|^2 = C \cdot \frac{P_N(k)}{|H(k)|^2} \tag{4}$$

が求められる。このパワースペクトルを持つ測定信号で測定を行えば一定の SN 比が実現される。ただし, 実際の測定では系の周波数特性 $H(k)$ は未知であるので, 簡単な予備測定を行い, その予測値 $\hat{H}(k)$ を用いて計算を行う。この $\hat{H}(k)$ には, 測定系の音響特性及び, 測定に用いた音響機器の特性が含まれる。

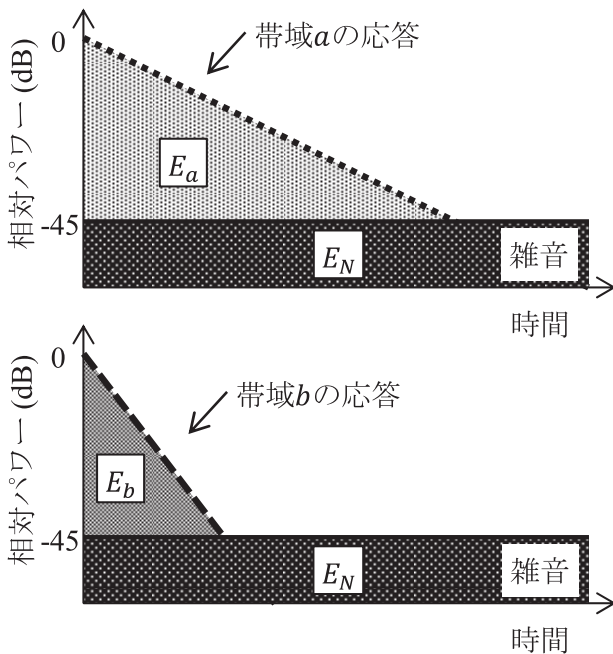


図-4 帯域別インパルス応答と雑音成分の短時間パワーモデル

3.2 CSN-SS 信号の概念の拡張

ここで式 (3) のように SN 比を一定と考えるのではなく、各周波数 k において所望の SN 比 $D_{SN}(k)$ で測定を行うことを考える。その場合、上記と同様の原理で、

$$|S(k)|^2 = D_{SN}(k) \cdot \frac{P_N(k)}{|H(k)|^2} \quad (5)$$

をパワースペクトルとして持つ信号で測定を行えば目的が達成できる。すなわち、式 (5) の信号で測定を行うことで、各帯域の SN 比を任意に制御することが可能となる。

このように各帯域で所望の SN 比を実現するように従来の CSN-SS 信号の概念を拡張した信号を本論文では Controllable Signal-to-Noise ratio Swept Sine (CSN-SS) 信号と名付け、「CSN」という略称はこの新しい信号の略称として再定義する。従来の Constant SN-SS 信号は Controllable SN-SS 信号の一形態で、 $D_{SN}(k) = C$ と置いた信号と位置づけられる。

以上が CSN-SS 信号における SN 比制御原理である。

3.3 一定の雑音レベルとするために必要な SN 比

2.2 節で述べた帯域別雑音レベルを一定とするためには、各帯域の SN 比は次のように定める必要がある。

図-4 に帯域別インパルス応答と雑音成分の短時間パワー特性のモデル図を示す。帯域別インパルス応答は最大値が 0 dB となるように正規化しており、雑音レベルは -45 dB である場合を示している。図より、最大値を正規化したときの帯域別インパルス応答のエネルギー (E_a や E_b の面積) は各帯域のインパルス応答の減衰特性によって異なることが分かる。一方、雑音成

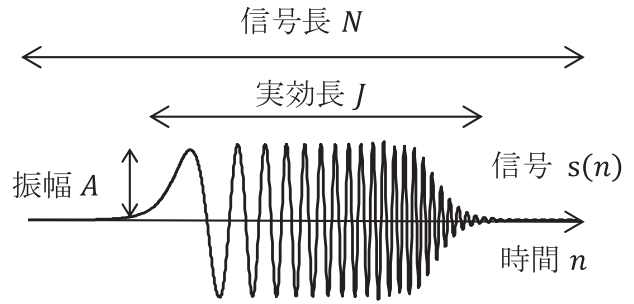


図-5 掃引正弦波 (SS) 信号の時間波形

分は -45 dB の定常雑音であるので、そのエネルギー E_N は帯域によらず一定となる。

以上より、第 p 番目の周波数帯域の所望 SN 比 $D_{SN}(p)$ を、帯域別インパルス応答のエネルギーと雑音成分のエネルギーの比として

$$D_{SN}(p) = E_p / E_N : p = 1, 2, \dots \quad (6)$$

と設定すれば図-4 のように帯域によらず一定 (-45 dB) の雑音レベルを持った測定結果を得ることができる。以下、雑音レベルを -45 dB とするための $D_{SN}(p)$ を「必要 SN 比」と呼ぶ。

なお、残響時間測定の対象外である帯域の SN 比は対象帯域の値と比べて十分に小さな値として、信号が余分なエネルギーを持たないように設定する。また、系の周波数特性 $H(k)$ や各帯域のインパルス応答エネルギー E_k の予測値は、雑音レベルを -20 dB 程度 [12] とした予備測定により求める。この場合、雑音レベルを -45 dB とする本測定に比べて、十分短時間な測定信号長で実行できる。

3.4 必要 SN 比を実現するための信号長

図-5 は掃引正弦波信号の時間波形の例を表す。図において、 N は信号長、 J は N の中で実質的に信号のエネルギーが存在する時間区間長で実効長と呼ぶ。 A は振幅である。この掃引正弦波信号 $s(n)$ のエネルギー E_s は、

$$E_s = \sum_{n=0}^{N-1} |s(n)|^2 = \frac{A^2}{2} \cdot J \quad (7)$$

と表される。ここで、 $s(n)$ と、その離散スペクトル $S(k)$ とは次式のパーセバルの関係 [13] が成立する。

$$\sum_{n=0}^{N-1} |s(n)|^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} |S(k)|^2 \quad (8)$$

式 (8) の左辺に式 (7) の関係を代入し、右辺に式 (5) を代入して整理すれば、

$$J = \frac{2}{A^2} \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} D_{SN}(k) \cdot \frac{P_N(k)}{|H(k)|^2} \quad (9)$$

の関係が得られる。式 (9) の N としては予備測定時の信号長 \hat{N} を用い、また $H(k)$ としては予備測定結果 $\hat{H}(k)$ を用いる。 $P_N(k)$ は数秒程度で測定し、 A^2 は DA 変換機の最大値に依存して定められる。以上より所望する SN 比 $D_{SN}(k)$ (式 (6) で帯域 p ごとに計算された $D_{SN}(p)$ を対応する離散周波数 k で表したものが与えられると、式 (9) より必要な掃引正弦波信号の実効長 J が求められる。

3.5 提案する残響時間測定法

図-6 に提案する CSN-SS 信号を用いた残響時間測定法の流れを示す。以下、図-6 に従い測定手順を説明する。

- ① 被測定系のインパルス応答の予備測定を行う。この予備測定は本測定と比べて短時間で行う。そして得られたインパルス応答を離散フーリエ変換して周波数特性の予測値 $\hat{H}(k)$ を得る。測定には MN-SS 信号や Log-SS 信号などの既存信号を利用する。
- ② ①で得られたインパルス応答に対し残響時間測定で用いる帯域通過フィルタを用いて帯域別のインパルス応答に分割する。そして図-4 に示したように各応答のピークレベルで正規化を行い、帯域別インパルス応答のエネルギー E_p を求める。そして帯域別の雑音レベルを -45 dB としたときの SN 比 (必要 SN 比 $D_{SN}(k)$) を求める。
- ③ 測定環境の雑音が定常であるとして、雑音のパワースペクトル $P_N(k)$ を測定する (数秒程度の測定データを利用する)。
- ④ 以上の予備測定で求められた $\hat{H}(k)$, $D_{SN}(k)$, $P_N(k)$ を用いて、式 (9) より本測定に必要な信号の実効長 J を計算する。

- ⑤ ④で計算した実効長 J の 1.3~2 倍を本測定の信号長 N として CSN-SS 信号を合成する。CSN-SS 信号のパワースペクトルは式 (5) の $H(k)$ を予備測定値で置き換えた次式

$$|S(k)|^2 = D_{SN}(k) \cdot \frac{P_N(k)}{|\hat{H}(k)|^2} \quad (10)$$

で求める。ただしこの式における $P_N(k)$, $\hat{H}(k)$ は予備測定の実効長で求めたスペクトルを本測定の信号長で計算しなおしたスペクトルを用いる。 $|S(k)|^2$ のパワースペクトルを持つ掃引正弦波信号の合成方法については文献 [8] の付録を参照されたい。

- ⑥ 合成した信号を用いてインパルス応答の本測定を行う。測定結果に対して、残響時間測定の対象帯域外の成分はフィルタで抑圧する。得られたインパルス応答を 1/3 オクターブバンド (又はオクターブバンド) に帯域分割し、各帯域の応答とする。この結果得られるインパルス応答の雑音レベルは、対象とするすべての帯域において -45 dB となっている。各帯域の残響曲線を求め、残響が -5 ~ -35 dB まで減衰する区間を最小二乗法によって直線近似して傾きを求め、各帯域の残響時間を求める。以上が提案する測定手順である。

4. 実音場測定による有効性の確認

提案法の有効性を確認するために多目的ホール (室容積約 $3,300 \text{ m}^3$) で測定を行った。測定環境における雑音の音圧レベルは約 66 dB で、そのパワースペクトルを図-7 に示す。信号の再生には、フルレンジスピーカ BOSE MM101 とサブウーファ YAMAHA NS-SW300 を用いた。図-8 に使用したスピーカとウーファの周波数応答特性を示す。信号を再生する際には

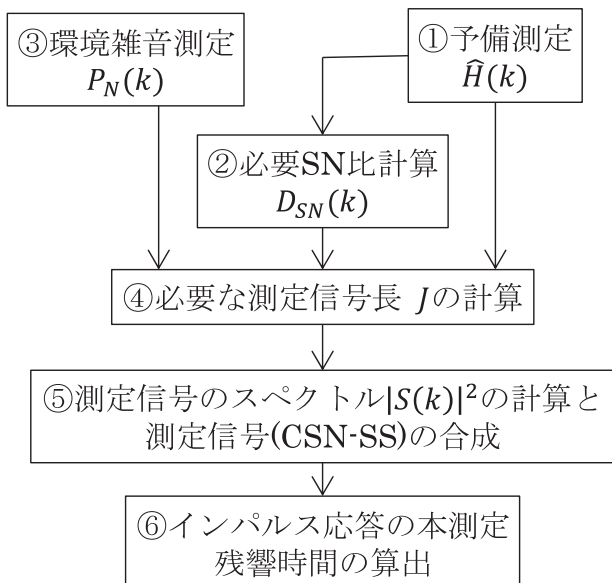


図-6 提案する残響時間測定法の手順

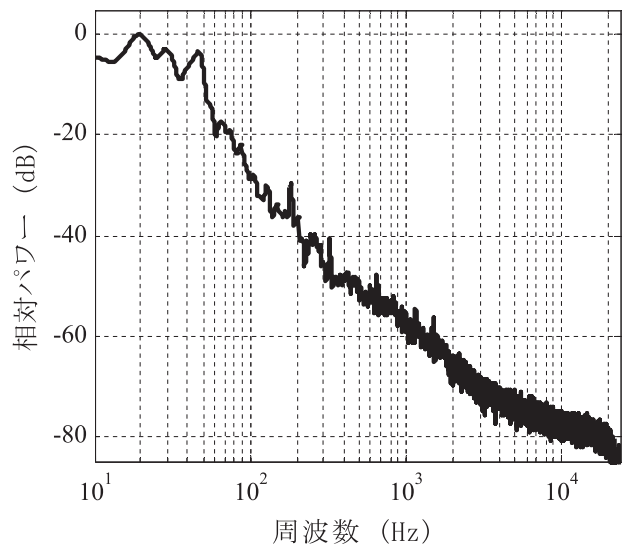


図-7 測定環境における雑音のパワースペクトル

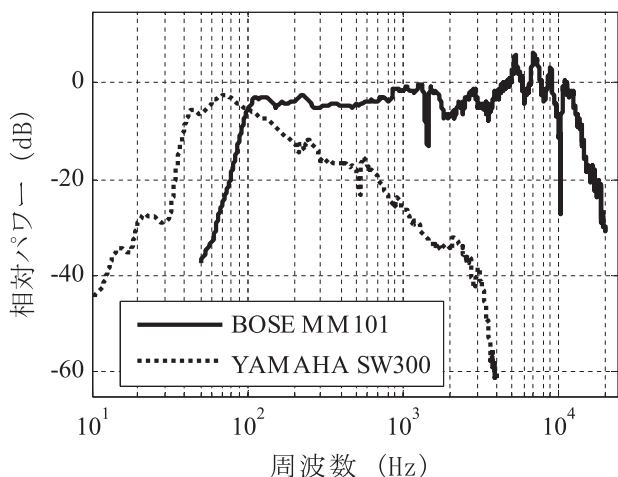


図-8 使用したスピーカーとウーファの周波数応答特性

中心周波数 150 Hz でクロスオーバーさせた。

実験では比較のため CSN-SS 信号のほかに従来の測定信号である TSP 信号, Log-SS 信号, MN-SS 信号を用いて測定を行った。各信号はすべて同一振幅, 同一信号長 (=同一エネルギー) のものを用いた。予備測定の結果, 式 (9) で得られた実効長 J は約 43,000 で, 信号長 N は約 77,000 とした。サンプリング周波数は 48 kHz としたので, $J=0.9$ 秒, $N=1.6$ 秒となる。

図-9 に実験に使用した測定信号 4 種のスペクトログラムを示す。一般的に室内騒音は低域が強いため, MN-SS 信号や CSN-SS 信号などの適応形信号は, 従来の測定信号に比べ特に低域の掃引時間が長く低域のエネルギーが大きくなっている。また, CSN-SS 信号のスペクトログラムに時間方向の広がりが見られるのは, 周波数成分の大小の変化によるものであるが, 図-1 の原理を満たしているのでインパルス応答の算出には影響しない。

信号は 2 周期再生し, その 2 周期目の録音結果よりインパルス応答を算出した。対象とする帯域は 1/3 オクターブバンドで, 中心周波数 63~8,000 Hz の 20 帯域で, 各測定信号で得られたインパルス応答から, それぞれの帯域の雑音レベル及び残響時間を求めた。

図-10 に, 測定結果のインパルス応答を示す。また, 図-11 に CSN-SS 信号を用いて得られた帯域別インパルス応答の短時間パワー特性と雑音レベルを示す。図-2 に示した TSP 信号の測定結果と比較したとき, いずれの帯域でも雑音レベルがほぼ -45 dB で一定となっていることが確認できる。

図-12 に CSN-SS 信号によって測定された系の周波数特性と, 含まれる雑音成分のスペクトルを示す。対象帯域内の雑音成分の大きさと周波数応答の差 (SN 比) は $D_{SN}(k)$ を反映しており, 今回の測定では 30 dB 程度であった。

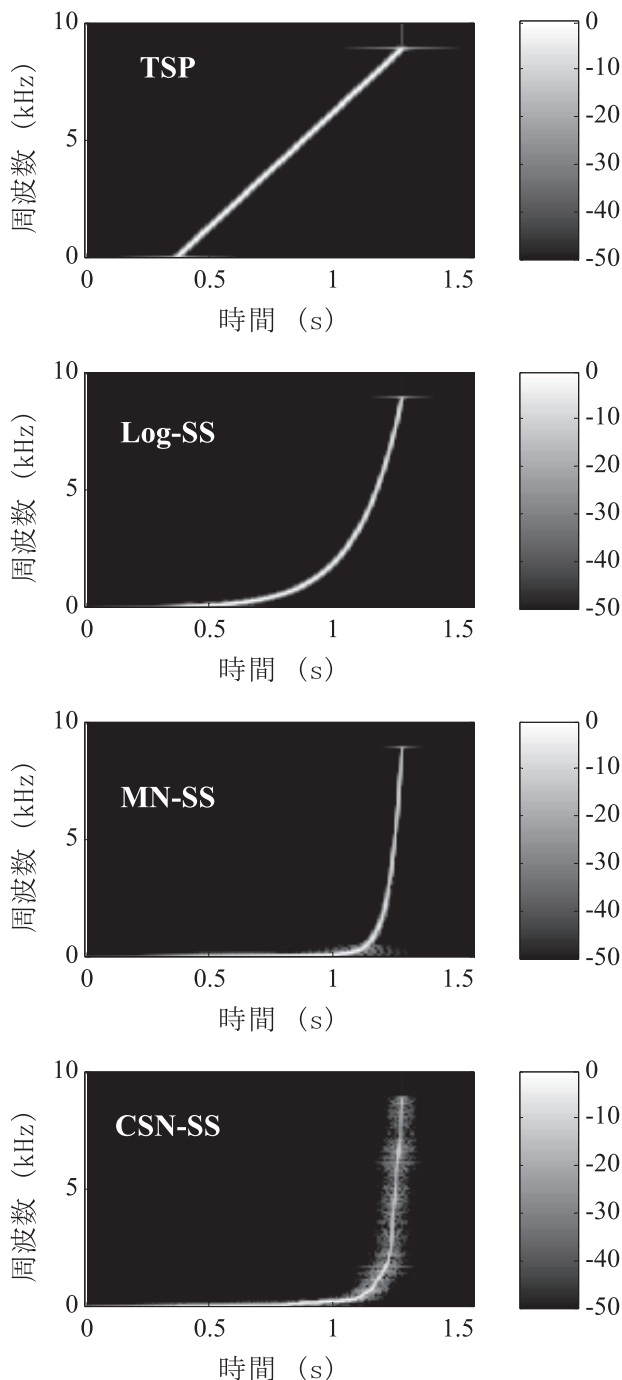


図-9 使用した各種測定信号のスペクトログラム

各測定信号によって得られたインパルス応答の帯域別雑音レベルを図-13 に示す。まず, 提案する CSN-SS 信号により得られたインパルス応答の帯域別雑音レベル (太い実線) は, 測定対象となる帯域 (縦点線内側: 63 Hz~8 kHz) において, 所望される雑音レベル -45 dB でほぼ一定の測定結果が得られている。それに対して, 従来信号である TSP 信号, Log-SS 信号, MN-SS 信号の測定結果は, 雑音レベルが帯域によって大きく異なっている。

MN-SS 信号の結果に注目すると, 316 Hz 帯域で雑音レベルが, -45 dB を約 5 dB 上回っており, 残響時

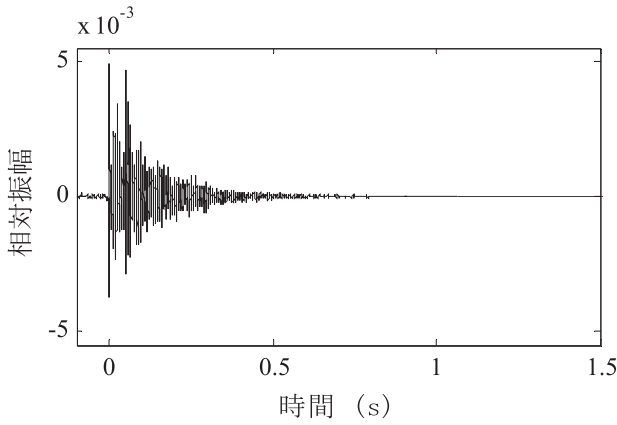


図-10 測定されたインパルス応答

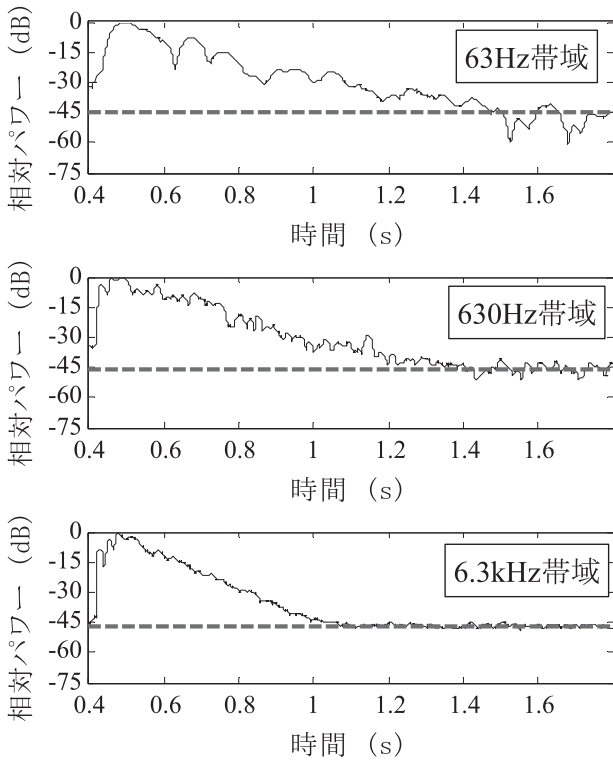


図-11 CSN-SS 信号を用いて測定した帯域別インパルス応答の短時間パワー特性 (破線はそれぞれの雑音レベルを表す)

間の算出には不適である。従って「対象とする全帯域で雑音レベルを -45 dB 以下とする」という要求条件を満たすためには、この 316 Hz 帯域の雑音レベルを 5 dB 低下させる必要がある。そして、そのためには測定信号エネルギーを約 3.2 倍にする必要があり、信号長を CSN-SS 信号に比べて約 3.2 倍にする必要がある。

同様に、TSP 信号の場合雑音レベルが約 22 dB 上回っており、これを信号長に換算すると 160 倍の信号長が必要になる。また、Log-SS 信号の場合、雑音レベルが約 7 dB 上回っており信号長に換算すると 5 倍の信号長が必要になる。

一方、従来信号が CSN-SS 信号よりも低い雑音レベ

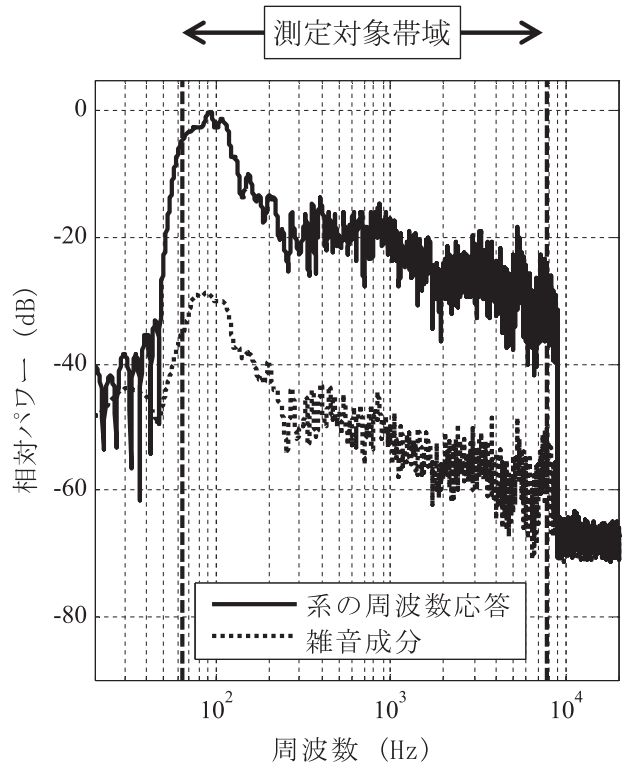


図-12 CSN-SS 信号を用いて測定された系の周波数特性と雑音成分のスペクトル

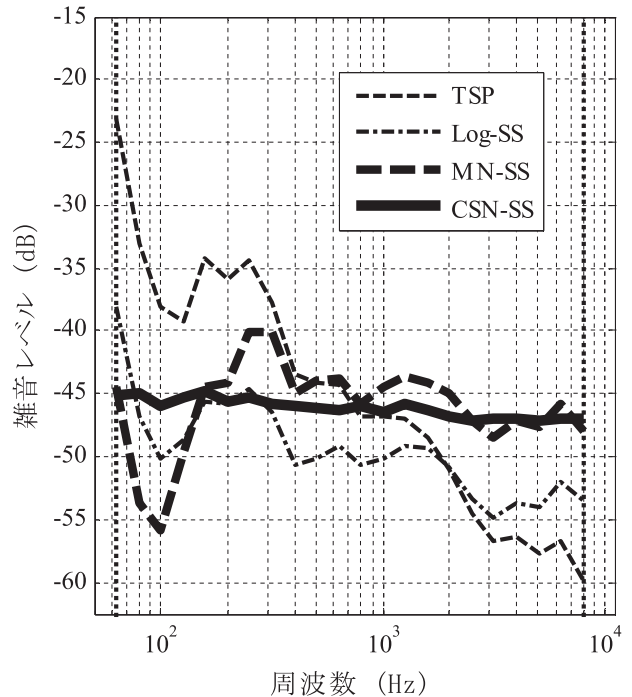


図-13 各測定信号により得られた測定結果の帯域別雑音レベル

ルを実現している帯域が多数あるが、これは「良い結果」ではなく、過剰品質のための無駄な測定時間を使用していることを意味する。

実際的な全測定時間の短縮効果は環境雑音スペクトルや計算機の演算能力に依存するが以下に一例を述べる。今回利用した Windows PC を用いた場合の準備

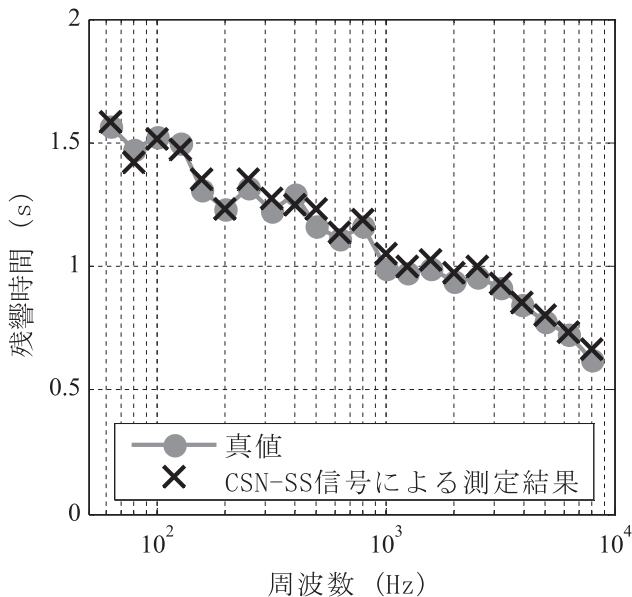


図-14 残響時間算出結果

時間（予備測定+測定信号の合成に要した時間）は約10秒であった。今回の測定環境は雑音レベルが低いため必要とする信号長は約1.6秒と短いものであったが、雑音レベルが今回より10dB大きい場合に必要とする信号長は10倍、すなわち約16秒となり、準備時間と合わせて約26秒の測定時間となる。これに対し、MN-SS信号は3.2倍の測定信号長、すなわち約51秒を必要とするため、提案法の全測定時間はMN-SS信号を用いた場合と比べて1/2の短縮となる。また、同様に、Log-SS信号に対しては1/3の測定時間の短縮となる。

最後に、CSN-SS信号を用いて測定したインパルス応答より算出した残響時間を図-14に示す。比較として、同一環境で長時間のLog-SS信号を用いてSN比を十分に高めて測定したインパルス応答より算出した残響時間を真値とした。図より、CSN-SS信号を用いる提案法により算出された残響時間は、真値とほぼ等しい結果が得られた。

5. シミュレーションによる検討

最後にシミュレーションを用いて、多様な雑音条件に対する提案法の有効性を確認した。

測定シミュレーションの諸条件は第5章の実環境実験と同じとした。測定信号はTSP信号、Log-SS信号、MN-SS信号と、提案法のCSN-SS信号の4種を用いた。被測定系のインパルス応答としては第5章の環境で測定した高SN比のインパルス応答を用い、測定信号と畳み込んだ。

測定環境の雑音として付加する雑音は、白色雑音、ピンクノイズ（パワースペクトルが周波数に反比例する雑音）、機械騒音を含んだ実録騒音、の3種とした。

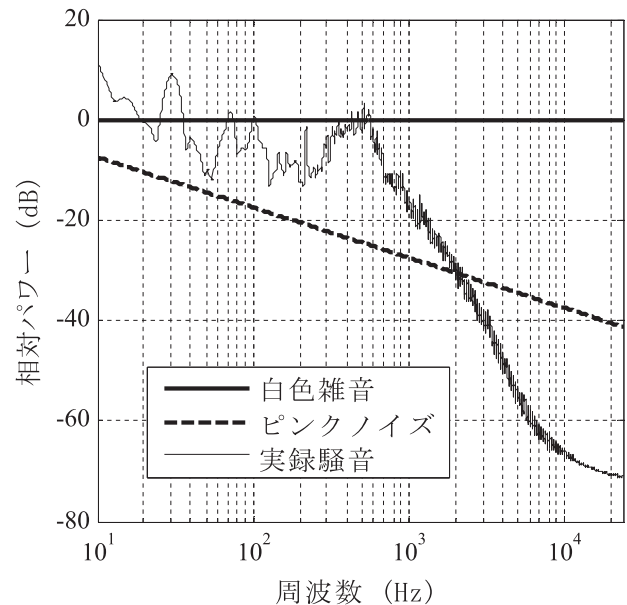


図-15 シミュレーションに用いた雑音のパワースペクトル

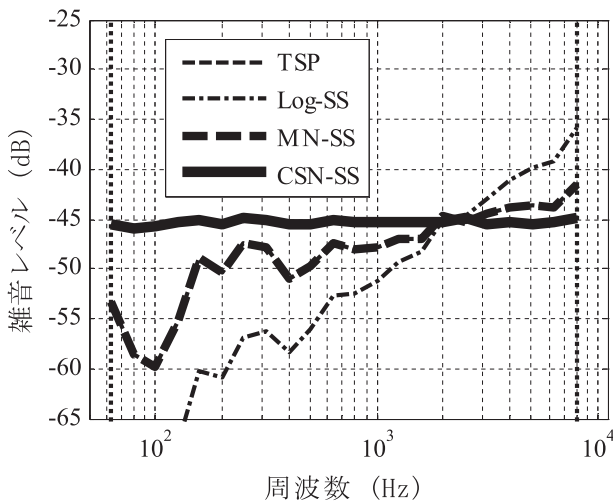
それぞれのパワースペクトルを図-15に示す。

シミュレーション結果の帯域別雑音レベルを図-16(a)(b)(c)に示す。白色雑音の場合(図-16(a))にはTSP信号が、雑音を最小化する信号となるのでMN-SS信号と線が重なったものとなっている。

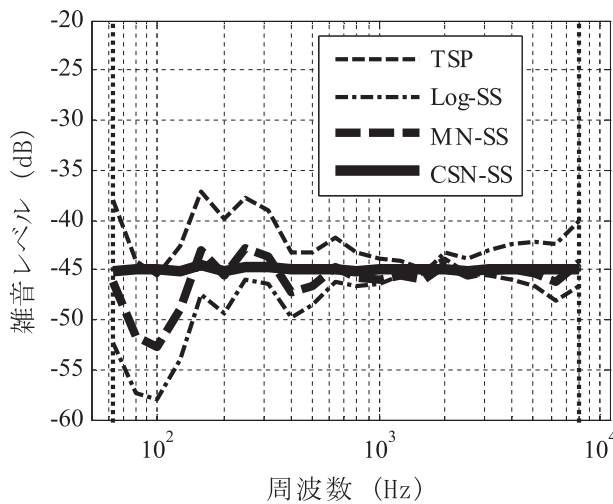
すべての図においてTSP信号、Log-SS信号、MN-SS信号では、各雑音に対し、雑音レベルが-45dBを上回る帯域が見られるのに対して、CSN-SS信号ではいずれの雑音に対してもほぼ-45dB一定の雑音レベルを達成しており、多様な雑音条件に対する提案方法の有効性が確認された。

6. まとめ

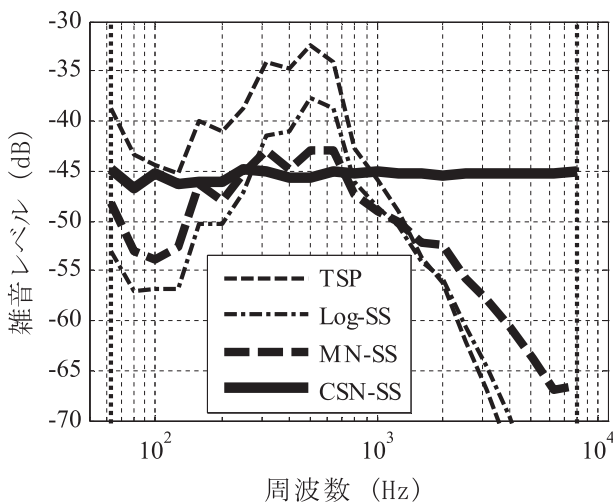
本報告では測定結果の帯域ごとのSN比を任意に制御できるインパルス応答測定用信号、Controllable Signal-to-Noise ratio Swept Sine信号（従来のCSN-SS信号の概念を拡張した信号であり、この信号をCSN-SS信号と再定義した）を用いた残響時間測定を提案した。この手法はまず短時間の予備測定を行うことで残響時間測定に必要な帯域別SN比と被測定系の周波数特性の予測値を求める、また測定環境の雑音スペクトルを事前学習する。そしてそれらより、必要な帯域別SN比を実現するために必要最小限の信号長を持つ信号を合成し測定を行うものである。本提案手法は以下の長所を持つ。1) 環境雑音や測定系の音響特性、測定に用いた音響機器の特性等によらず、測定された帯域別インパルス応答の雑音レベルが全対象帯域においてほぼ-45dBとなり、残響時間測定の品質が保証される。2) 従来のインパルス応答測定信号と比べて短時間で効率的な残響時間測定が可能である。



(a) 白色雑音



(b) ピンクノイズ



(c) 実録騒音

図-16 シミュレーション結果の帯域別雑音レベル

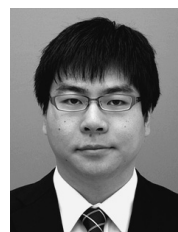
実音場実験の結果、本測定手法は従来の代表的な測定信号である Log-SS 信号を用いた場合と比べて約 1/5 の測定信号長で正しく残響時間を算出することができた。

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] ISO 3382-1:2009(E), Acoustics — Measurement of room acoustics parameters — Part 1: Performance spaces.
- [2] N. Aoshima, “Computer-generated pulse signal applied for sound measurement,” *J. Acoust. Soc. Am.*, **69**, 1484–1488 (1981).
- [3] 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).
- [4] M.R. Schroeder, “Integrated impulse method measuring sound decay without using impulses,” *J. Acoust. Soc. Am.*, **6**, 497–500 (1979).
- [5] J. Borish, “Self-contained crosscorrelation program for maximum-length sequences,” *J. Audio Eng. Soc.*, **33**, 888–891 (1985).
- [6] 藤本卓也, “低域バンドでの SN 比改善を目的とした TSP 信号に関する検討—高調波歪の除去—,” 音講論集, pp. 555–556 (2000.3).
- [7] A. Farina, “Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique,” *108th AES Convention*, 5093, (D-4) (2000).
- [8] 守谷直也, 金田 豊, “雑音に起因する誤差を最小化するインパルス応答測定信号,” 音響学会誌, **64**, 695–701 (2008).
- [9] 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法の検討,” 音講論集, pp. 879–880 (2010.3).
- [10] H. Ochiai and Y. Kaneda, “Impulse response measurement with constant signal-to-noise ratio over a wide frequency range,” *Acoust. Sci. & Tech.*, **32**, 76–78 (2011).
- [11] Y. Kaneda, “Noise reduction performance of various signals for impulse response measurement,” *J. Audio Eng. Soc.*, **63**, 348–357 (2015).
- [12] 中原優樹, 金田 豊, “残響時間測定効率化のための CSN-SS 信号における事前測定条件の検討,” 音講論集, pp. 767–768 (2015.3).
- [13] 足立修一, MATLAB によるデジタル信号とシステム (東京電機大学出版局, 東京, 2002), p. 83.



中原 優樹

2014 年東京電機大学工学部卒。同年、東京電機大学大学院工学研究科修士課程進学、現在に至る。音響信号処理・音響計測の研究に従事。電子情報通信学会、日本音響学会、各会員。



金田 豊

1977 年名古屋大学大学院修士課程了。同年日本電信電話公社 (現 NTT) 入社。NTT 研究所において、マイクロホンアレイ信号処理などの音響信号処理の研究に従事。2000 年より東京電機大学情報通信工学科教授。現在に至る。工博。