

CSN-SS 信号による残響時間測定効率化について

中原 優樹[†]

金田 豊[‡]

東京電機大学工学部 〒120-8551 東京都足立区千住旭町 5 番

E-mail: {[†]09ec092@ms, [‡]kaneda@c}.dendai.ac.jp

あらまし インパルス応答測定用信号として、これまで TSP 信号を始めとしてさまざまな信号が提案されてきた。その中で CSN-SS (Constant SN ratio-Swept Sine) 信号は、測定結果の SN 比が周波数によらず一定であるという特徴を持った信号である。一方、インパルス応答を用いて室内音響の代表的評価量である残響時間を測定する場合、広い帯域において一定値以上の SN 比が求められている。このことを従来の測定信号で実現しようとする、SN 比の悪い周波数帯域の制約を受けるため、長時間の測定信号が必要とされる場合があった。本報告では、前記 CSN-SS 信号の特徴を利用すれば、残響時間測定効率化が図れると考え、その測定手順を検討した結果を報告する。そして、CSN-SS 信号は環境雑音および対象系に対する予備測定が必要であるが、その点を考慮しても従来の測定信号と比べて残響時間測定効率化が図れることを実験結果により報告する。

キーワード 残響時間, インパルス応答, SN 比,

Effective measurement method of reverberation time using CSN-SS signal

Yuki NAKAHARA[†] and Yutaka KANEDA[‡]

School of Engineering, Tokyo Denki University, 5 Senju-asahi-cho, Adachi-ku, Tokyo 120-8551, Japan

E-mail: {[†]09ec092@ms, [‡]kaneda@c}.dendai.ac.jp

Abstract Various signals, such as TSP signals, have been proposed for the measurement of impulse response. Among these signals, the measurement results of CSN-SS (constant signal-to-noise ratio-swept sine) signals show a constant signal-to-noise ratio (SNR) independent of frequency. On the other hand, an SNR exceeding a specific value is required over a wide frequency range for measuring the reverberation time, which is one of the representative characteristic parameters of room acoustics. To achieve this with a conventional measurement signal, a long measurement time is required because frequency bands with a low SNR are present. In this report, we propose an effective method of reverberation time measurement using the CSN-SS signal. Although preliminary measurements of the target system and ambient noise are required, experimental results show that the CSN-SS signal is more effective than conventional measurement signals for reverberation time measurement.

Key words Reverberation Time, Impulse Response, Signal-to-Noise Ratio

1. はじめに

室内インパルス応答は、室内音響系にインパルス音を入力したときの応答であって、この応答から残響時間を始めとしたさまざまな室内音響特性評価量が計算できる重要な基本量である[1]。しかし実際の環境で測定するには空調騒音を始めとした環境騒音が存在し、また、インパルス音のエネルギーは小さいため、インパルス測定結果の SN 比が低下し、音響評価量の計算に誤差が発生するという問題があった。そこでこれまで、SN 比を改善するために、エネルギーの大きい様々なインパルス応答測定信号が提案されてきた。

最も代表的な測定信号としては、TSP 信号[2][3]が知られている。TSP 信号は白色スペクトルを持った SS (Swept Sine : 掃引正弦波) 信号であり、信号が有限時間で収束しているので取扱いが簡単という特徴を持つ。また、同様に白色スペクトルを持つ測定信号とし

ては、M 系列が知られている[4]。

一方、Log-SS (ピンク TSP) 信号[5][6]は、 $1/f$ 特性のパワースペクトルを持った測定信号である。Log-SS は低域成分のエネルギーが大きいという特徴を持つため、一般に低域成分のエネルギーが大きい室内騒音に対する SN 比の改善に効果的である。

以上の信号は固定的なスペクトルを持った信号であるが、近年、測定環境の雑音スペクトル（以下、室内騒音および測定系の電氣的雑音などを雑音と総称する）を事前学習して、その結果を反映した適応形スペクトルを持つ測定信号の検討が進められている。例えば、守谷らの提案した雑音最小化掃引正弦波 (MN-SS) [7]は、雑音のパワースペクトル $P_N(\omega)$ に対して $\sqrt{P_N(\omega)}$ のパワースペクトルを持ち、測定されたインパルス応答に含まれる雑音成分を最小化することができる。

このように従来のインパルス応答測定用の信号を利用することでインパルス応答測定結果の SN 比を向上することができる。しかし、従来信号で得られる測定結果の SN 比は周波数依存性を持つ、という問題点がある。室内音響特性評価量は多くの場合、例えばオクターブバンド分析などを用いて、周波数ごとに値を求めることが多い。その場合、全体として SN 比が改善されたとしても、ある特定の帯域の SN 比が改善されていない場合には、その帯域の特性評価量が不良となるため、より一層の SN 比改善が求められる。

これに対して近年筆者らは、対象とする周波数帯域で一定の SN 比を実現する CSN(Constant SN ratio)-SS 信号を提案し、有効性の検討を進めている[8][9]。本報告では CSN-SS 信号を用いることによって残響時間測定を効率化できることの検討結果を報告する。

以下、第 2 章ではインパルス応答測定原理を概説し、第 3 章では CSN-SS 信号がインパルス応答の SN 比を一定化できることについて述べる。次に第 4 章において、CSN-SS を用いた残響時間測定方法を提案し、第 5 章では実音場実験によって提案方法の有効性を確認する。最後に、第 6 章で結びを述べる。

2. インパルス応答測定原理と帯域別 SN 比

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。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わかりやすいので、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、雑音の無い理想環境での測定系を示している。図において周波数特性 $H(k)$ をもつ被測定系に信号 $S(k)$ を入力した場合の応答は $H(k) \cdot S(k)$ となり、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。ただし、 k は離散周波数番号を示す。また簡単のために図中は周波数変数 (k) を省略した。対して実環境においては、図 1(b)に示すように、系の応答に雑音が付加され $H(k) \cdot S(k) + N(k)$ 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 $N(k)/S(k)$ という雑音成分が含まれる。このときの SN 比は所望の成分 $H(k)$ と雑音成分 $N(k)/S(k)$ のパワー比として次式のように表される。

$$SNR = \frac{|H(k)|^2}{E\{|N(k)|^2\}/|S(k)|^2} = \frac{|H(k)|^2}{P_N(k)/|S(k)|^2} \quad (1)$$

ただし、 $E\{\cdot\}$ は期待値を表し、 $P_N(k)$ は環境雑音のパワースペクトルを表す。式(1)からわかるように、一般に、SN 比は周波数 k に依存して変化する。

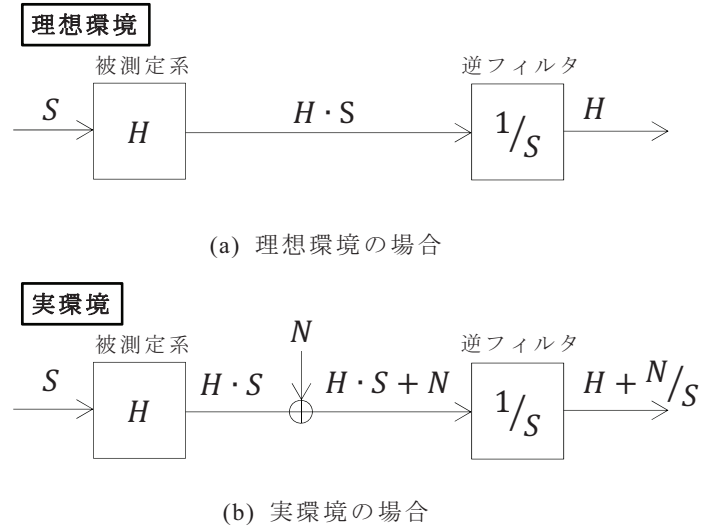


図 1 インパルス応答の測定原理

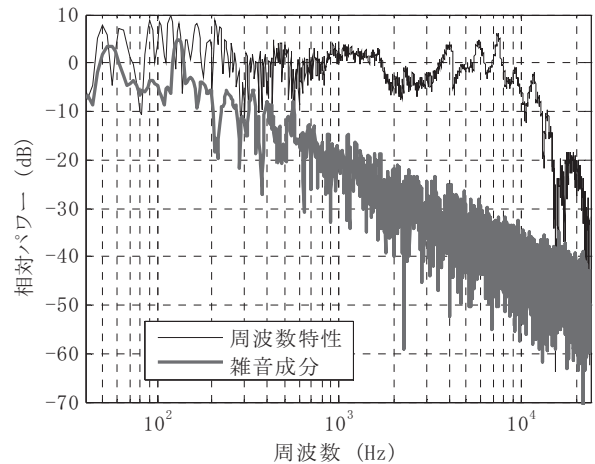


図 2 TSP 信号による測定結果例

図 2 に TSP 信号を用いて測定した場合の周波数特性 $H(k)$ とそこに含まれる雑音成分 $P_N(k)$ の例を示す。TSP 信号は平坦スペクトルを持つため測定結果に含まれる雑音成分は付加された雑音のパワースペクトル $P_N(k)$ と同一のスペクトルを持つ。一般に室内雑音のエネルギーは低域において大きく、また、再生用スピーカも低域と高域の両端で応答が小さいため、周波数特性の両端で測定結果の SN 比が低下していることがわかる。室内音響特性評価量を求めるとき、このような SN 比の低い帯域では良好な結果が得られないので、目的とする各帯域において最低限の SN 比を確保する必要がある。そのために従来法では信号の長さを長くしたり、同期加算を多数回行うなどによって、最低 SN 比の帯域の SN 比を向上させるが、そのためには測定時間の増加を伴い、また、SN 比の良い帯域では必要以上の SN 比の向上がなされる。このような問題を解決するた

めに、各帯域を一定の SN 比とする CSN-SS 信号の利用が有効である。

3. CSN-SS 信号

3.1. 帯域ごとの SN 比を一定とするスペクトル

帯域ごとの SN 比を一定とするためには測定用信号に特定のスペクトルを持たせればよい。式(1)の SN 比が周波数 k によらず、一定値 D_{SN} であることを表すと

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

と表せる。式(2)を信号のパワースペクトル $|S(k)|^2$ について解くと

$$|S(k)|^2 = D_{SN} \cdot \frac{P_N(k)}{|H(k)|^2} \quad (3)$$

となる。よって、式(3)右辺のパワースペクトルを持つ測定信号で測定すれば帯域ごとの SN 比が一定となることがわかる。実際の測定では系の応答 $H(k)$ は未知であるので、簡単な事前測定を行い、その予測値 $|\hat{H}(k)|$ から信号スペクトルの計算を行う。

3.2. 所望 SN 比と信号長との関係

図 3 は SS 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 SS 信号 $s(n)$ のエネルギー E_s は、

$$E_s = \sum_{n=0}^{N-1} |s(n)|^2 = \frac{A^2}{2} \cdot J \quad (4)$$

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

$$\sum_{n=0}^{N-1} |s(n)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |S(k)|^2 \quad (5)$$

式(5)に式(3)(4)を代入して整理すれば、

$$J = \frac{2}{A^2} \cdot D_{SN} \cdot \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} W(k) \cdot \frac{P_N(k)}{|\hat{H}(k)|^2} \quad (6)$$

の関係が得られる。ただし、 $W(k)$ は測定対象とする帯域を規定する関数で、対象帯域では $W(k) = 1$ 、それ以外では $W(k) \ll 1$ とする。 A^2 は DA 変換時の最大値に依存して規定される。また、式(6)に含まれる

$$\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} W(k) \cdot \frac{P_N(k)}{|\hat{H}(k)|^2} \quad (7)$$

の項は、 $P_N(k)/|H(k)|^2$ の周波数平均を表すので、雑音長をインパルス応答長に合わせてカットして $P_N(k)$ を計算すれば、 N の値にはあまり依存しない。

よって、式(6)より、所望とする SN 比が D_{SN} として与えられると、必要な SS 信号の実効長 J が求められる。

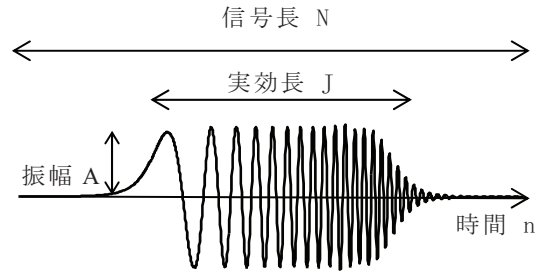


図 3 SS 信号の時間波形

4. CSN-SS 信号を用いた残響時間測定

従来の CSN-SS 信号の検討においては、SN 比が大変低い環境も想定していたため、複数回の繰り返し測定を行うものであった[8]。しかし残響時間測定においては、測定結果の SN 比が対象とする帯域で 0dB を下回るような環境は少ない。そこでそのような条件を踏まえて、繰り返し測定の無い CSN-SS 信号による残響時間測定の手順を提案する。以下、図 4 に従って説明する。

- ① 対象とする周波数帯域 $W(k)$ と所望 SN 比 D_{SN} を決定する。例えば、ISO3382 によれば、インパルス応答の二乗積分曲線を用いて残響時間を測定する際に、SN 比は 100~5000Hz の間で 45dB 以上であることが推奨されている[10]。
- ② 測定環境の雑音が定常であるとして、雑音の測定を行い、雑音のパワースペクトル $P_N(k)$ を計算する。(数秒程度の測定データを利用)
- ③ 被測定系の応答を事前に測定する。測定には雑音を最小化する測定信号 ($\sqrt{P_N(k)}$ のパワースペクトルを持った信号) [7] を利用する。この測定では、残響時間の測定ほど SN 比を高くする必要はなく、対象とする周波数帯域で 10dB 程度の SN 比が得られるような短時間の信号を用いた測定でよい。
- ④ 得られた事前測定の結果から、式(6)により、必要な信号の実効長を計算する。ただし $|\hat{H}(k)|^2$ は③で得られたインパルス応答を大まかなインパルス応答長 \hat{N} で切り出して DFT したものであり、 $P_N(k)$ も同じ長さ \hat{N} で雑音を切り出して DFT し平均パワーを求めたものである。所望 SN 比は ISO の推奨する 45dB とする。その際、信号実効長が大きすぎてプログラムに支障がある場合などの時は、同期加算を併用する、などの対応をとる。
- ⑤ 求めた信号長で式(3)のパワースペクトルを持つ CSN-SS 信号を合成し、本測定を行う。この結果得られるインパルス応答の SN 比は対象の帯域で所望の SN 比となっている。
- ⑥ インパルス応答をフィルタリングし複数のバンドの信号に分ける。

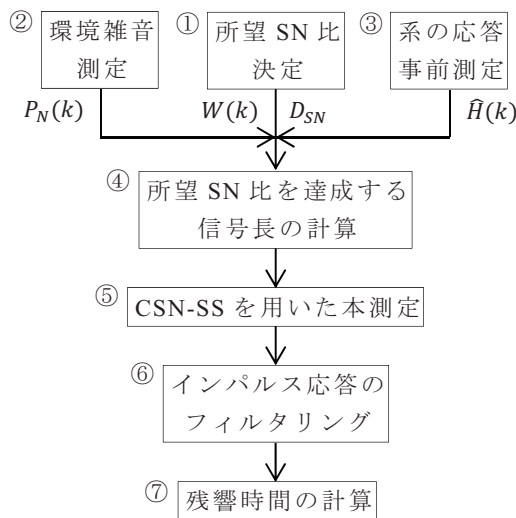


図 4 CSN-SS を用いた残響時間測定フロー

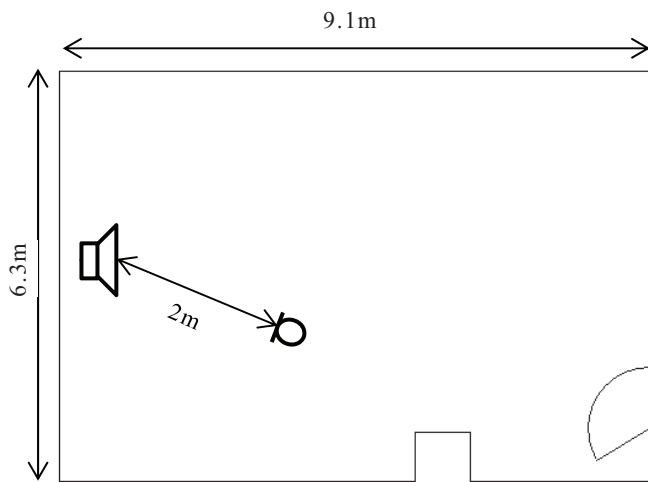


図 5 実験時の配置図

- ⑦ 各バンドの残響曲線を求め、残響が-5~-35dB まで減衰する部分を最小二乗法によって直線近似して傾きを求め、各バンドの残響時間を求める。必要に応じて各バンドの残響時間を平均し被測定系の残響時間とする。

以上のような手順[11]で測定を行う。

5. 測定実験

CSN-SS 信号の有効性を検討するために、残響時間の測定実験を行った。実験は室寸法が $9.1 \times 6.3 \times 2.8$ [m], 残響時間が約 1.2s の教室において行った。再生用スピーカーは BOSE 製 MM-101 を用い、スピーカーマイクロホンは図 5 に示すように配置した。マイクは直接音の強い影響を避けるため、スピーカーの軸より 30° ずらして配置した。

実験では比較のため、CSN-SS 信号に加えて従来の

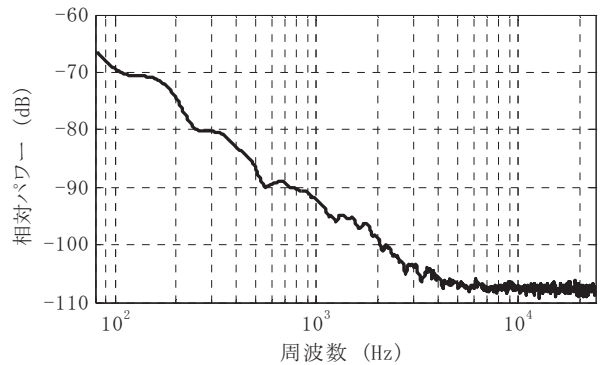


図 6 環境雑音のスペクトル $P_N(k)$

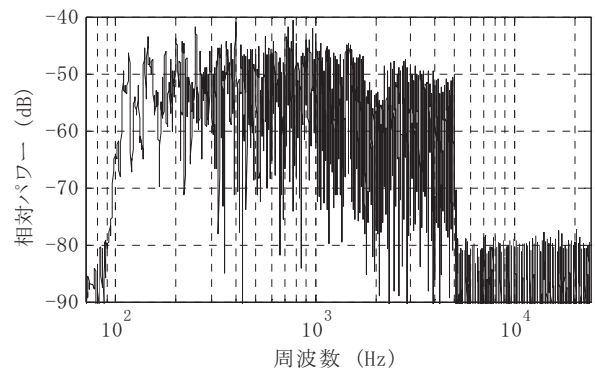


図 7 事前測定で求めた系の周波数応答 $|\hat{H}(k)|^2$

測定用信号である TSP 信号および Log-SS 信号を用いて測定した。対象とする帯域は $100 \sim 5000$ Hz で、 $125 \sim 4000$ Hz の 16 の $1/3$ オクターブバンドの残響時間を求めた。残響時間 T_{30} を求めるためには、これらの帯域のすべてにおいて 45 dB 以上の SN 比実現する必要がある[10]。サンプリング周波数は 48 kHz とした。

CSN-SS による測定では、最初に環境雑音を数秒録音してそのパワースペクトル $P_N(k)$ を計算した。結果を図 6 に示す。図より、この環境雑音は空調等の影響で低周波域に大きな成分を持ち、周波数の上昇に伴って約 -8 dB/oct. で減衰する特性を持っている。次にこの特性を反映させた雑音最小化掃引正弦波 MN-SS ($\sqrt{P_N(k)}$ のパワースペクトルを持つ掃引正弦波) 信号を用いて被測定系の簡易測定を行った。信号長は 2^{17} (約 2.7 秒) とした。図 7 に測定結果 $|\hat{H}(k)|^2$ を示す。MN-SS 信号は $100 \sim 5000$ Hz で設計をしたので、 100 Hz 以下および 5000 Hz 以上での測定結果は得られていない。

以上の結果より得られた $P_N(k)$, $|\hat{H}(k)|^2$ を用い、SS 信号の振幅を $A = 0.5$ として、所望 SN 比 $D_{SN} = 45$ dB を達成する信号の実効長は、式(6)より、 $J = 2^{19}$ と求められ、信号長は $N = 2J = 2^{20}$ (約 22 秒) とした。そして、式(3)より求められたパワースペクトルを持つ掃引正弦波を文献[7]に示した方法で合成した。図 8 に合成した CSN-SS 信号のスペクトログラムを示す。図より、

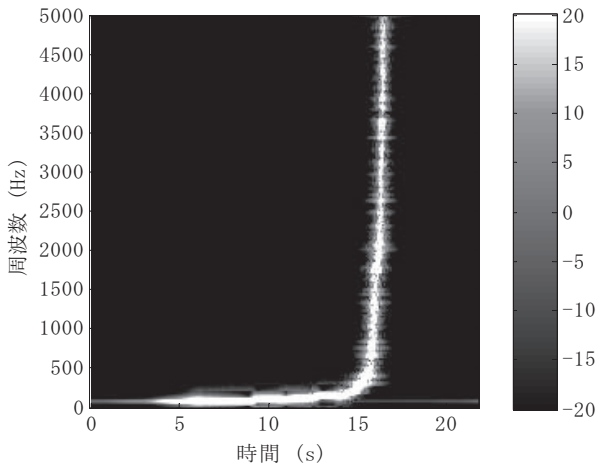


図 8 合成された CSN-SS 信号のスペクトログラム

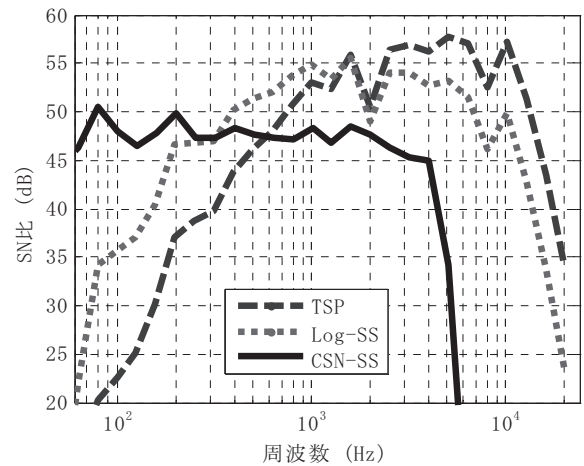


図 10 各測定信号による測定結果の帯域別 SN 比

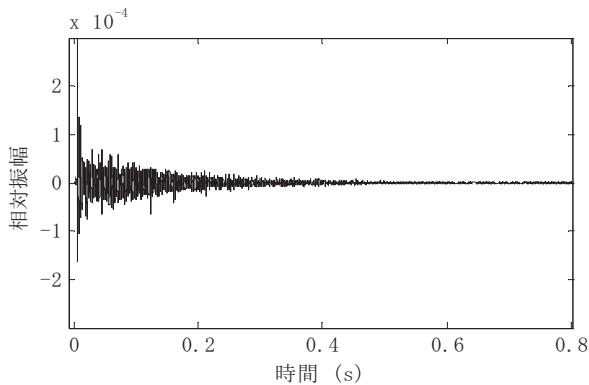


図 9 測定結果のインパルス応答

SN 比の低い低周波数の掃引時間が長く低域のエネルギーが大きいこと、また、雑音パワーが小さく SN 比が大きい高周波成分は掃引時間が短いことがわかる。

そして、合成した CSN-SS 信号、および、同一長で同一エネルギーを持った TSP 信号、LOG-TSP 信号を用いて室内インパルス応答を測定した。図 9 に CSN-SS 信号によって測定されたインパルス応答波形を示す。また図 10 に各測定信号によって測定されたインパルス応答の 1/3oct.バンド周波数帯域毎の SN 比を示す。この値は、各測定信号のインパルス応答をフーリエ変換したパワー応答 $|H(k)|^2$ と、事前測定した環境雑音に図 1(b)に示した測定信号の逆フィルタをかけたもののパワー $P_N(k)/|S(k)|^2$ との比として計算したものである。

図より、CSN-SS 信号は対象とした帯域で目標の 45dB をほぼ達成していることがわかる。一方、TSP 信号による測定結果では、高域では 60dB 近い SN 比であるが、低域の SN 比が大きく低下していることがわかる。また、Log-SS による測定結果では、TSP より低域の SN 比は向上するが 200Hz 以下で SN 比の低下が大きいことがわかる。

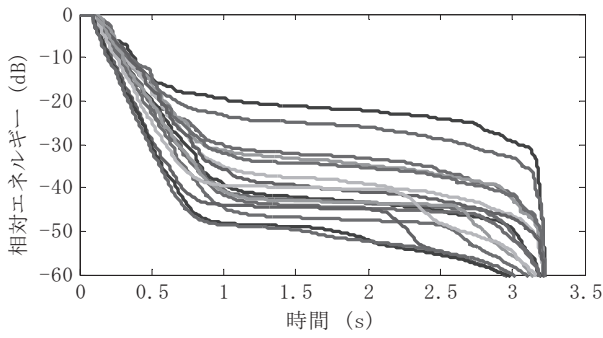
ここで 125Hz バンドの SN 比に注目すると、TSP 信号による SN 比は約 25dB、Log-SS 信号による SN 比は約 37dB となっている。このとき目標とする SN 比 45dB を達成するためには TSP 信号の測定では 100 回以上の同期加算を行って SN 比を 20dB 改善する必要があり、また、Log-SS 信号の場合でも 7 回以上の同期加算が必要となり、それだけ測定時間が増大する。換言すれば、CSN-SS 信号による測定では、TSP 信号に対して約 1/100、Log-SS 信号に対して約 1/7 の測定時間の短縮が可能となる。

図 11(a)~(c)に TSP 信号、Log-SS 信号、CSN-SS 信号のそれぞれを測定用信号として得られたインパルス応答より求めた 125~4000Hz の各 1/3 オクターブバンドの残響曲線を重ね書きしたものを示す。従来の測定用信号である TSP 信号と Log-SS 信号の結果(a),(b)を見ると、各バンドによってノイズフロアレベルの差が大きいことがわかる。これは各バンドの SN 比が一定でないため、ノイズフロアレベルが大きい帯域では、正しい残響時間を求めることができない。一方図 11(c)の CSN-SS 信号による結果を見ると、各バンドの SN 比がほぼ一定となっているため、帯域によらずほぼ一定のノイズフロアレベルが得られている。

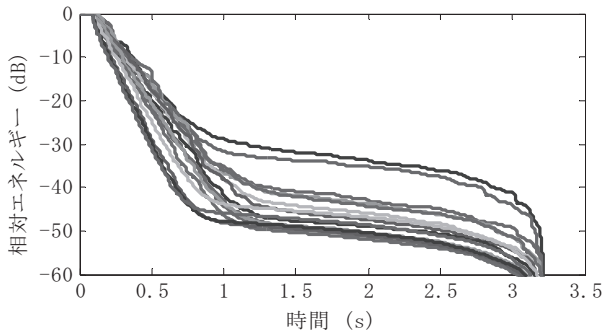
なお図 11(c)では CSN-SS の測定結果の SN 比が 40dB 程度のように見えるが、これはノイズフロアの比較がわかりやすいように、インパルス応答を長めに切り出したためである。雑音区間を短くして求めた残響曲線を図 12 に示す。全帯域で、45dB 以上のノイズフロアが得られていることがわかる。最後に図 12 より求めた各バンドの残響時間を図 13 に示した。

6. まとめ

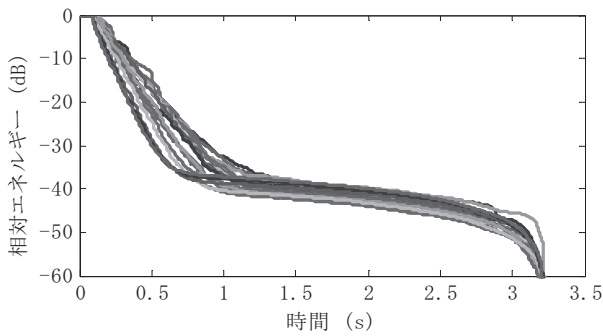
本報告ではインパルス応答の帯域ごとの SN 比を一定とする掃引正弦波信号、CSN-SS 信号を用いた残響時間測定法を提案した。この手法は、数秒程度の環境



(a) TSP 信号による結果



(b) Log-SS 信号による結果



(c) CSN-SS 信号による結果

図 11 各測定信号による残響曲線

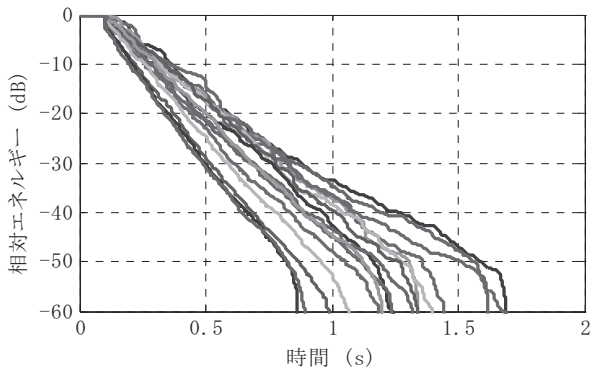


図 12 雑音区間を短くして求めた残響曲線

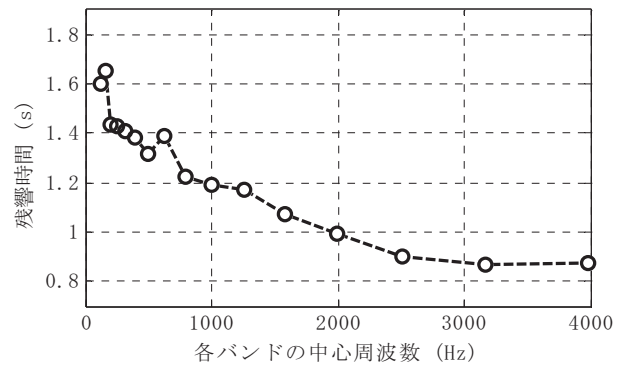


図 13 各バンドの残響時間

雑音と被測定系の予備測定を行うことで、CSN-SS 信号の信号長とスペクトルを算出する。そしてこの信号を用いた測定結果は対象とする全周波数範囲で所望の SN 比を実現する。実環境実験を行った結果、本測定手法は予備測定を除いて、TSP 信号を用いた場合と比べて約 1/100、Log-SS 信号を用いた場合と比べて約 1/7 の測定時間短縮が可能であることを示した。

文 献

- [1] 橋秀樹, 矢野博夫, 環境騒音・建築音響の測定, pp. 145-160, コロナ社 (2004).
- [2] N. Aoshima, "Computer-generated pulse signal applied for sound measurement," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 69, no. 5, 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, 2, 1119-1123 (1995).
- [4] 下記文献の参考文献: 金田 豊, "M 系列を用いたインパルス応答測定における誤差の実験的検討", *音学誌*, 52, 10, 752-759 (1996).
- [5] 伊藤次男, "音響測定装置およびその装置," 特開平 5-118906, (1993).
- [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—," *音講論春* 555-556 (2000).
- [7] 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," *音学誌*, 64, 12, 695-701 (2008).
- [8] 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).
- [9] H. Ochiai and Y. Kaneda, "A recursive adaptive method of impulse response measurement with constant SNR over target frequency band," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 61, no. 9, pp. 647-655 (2013 Sept).
- [10] ISO 3382-1:2009(E), Acoustics — Measurement of room acoustics parameters — Part 1: Performance spaces
- [11] 本報告で使用した測定プログラムを下記 URL に掲載した。
http://www.asp.c.dendai.ac.jp/asp_top0.html