

CSN-SS 信号を用いた効率的な残響時間測定法について  
Efficient measurement of reverberation time using CSN-SS signal.

中原 優樹                      金田 豊  
Yuki NAKAHARA              Yutaka KANEDA

東京電機大学工学研究科  
Graduate School of Engineering, Tokyo Denki University.

**内容概要** 残響時間の測定方法は ISO3382 に規定されており、音場のインパルス応答の 2 乗積分から求めることができる。この時、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が、従来のインパルス応答測定信号では測定結果の雑音レベルが帯域ごとに異なることが原因となっており、要求される雑音レベルを実現するためには、時間的に非効率な測定を必要としていた。これに対し本報告ではインパルス応答測定の際に、測定信号として constant signal-to-noise ratio swept sine (CSN-SS) 信号を用いることで、対象帯域において一定の雑音レベルを実現し、残響時間測定の短時間化、効率化が図れることについて述べる。

## 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条件は ISO3382[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。

音響系のインパルス応答は、残響時間の他にもさまざまな音響特性評価量が計算できる重要な基本量である。しかし、実環境においては雑音等の影響により測定結果の SN 比が低下することにより評価量の計算結果に誤差が生じてしまう。この問題を解決するために、インパルス応答測定用の信号を用いて SN 比の改善が試みられている。

測定信号の中で最も代表的なものとして TSP 信号 [2]が挙げられる。TSP 信号は、時間に比例して周波数が上昇 (または下降) するような掃引正弦波 (SS : Swept Sine) 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 [3]。

もう一つの代表的測定信号としては Log-SS (またはピンク TSP, または ESS : Exponentially Swept Sine)

信号が挙げられる [4]。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。

しかし、以上のような従来のインパルス応答測定用の信号は固定的なスペクトルを持った信号である。これに対し測定対象系の周波数応答や雑音のスペクトルは環境によってさまざまに変化するため、得られるインパルス応答の雑音レベルは、周波数に依存して変化したものとなる。

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雑音レベルが一定値以下であることが求められる。この時、特定の帯域の SN 比が低いと、その帯域の残響時間算出結果が不良となるため、全体的な SN 比の改善が求められ、このことは測定時間の増大につながる。

これに対し本研究では、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、その結果より導出した最適なインパルス応答測定用信号、constant signal-to-noise ratio swept sine (CSN-SS)

信号[5]を合成する．そして，この CSN-SS 信号を用いることで，残響時間測定の短時間化，効率化が図れる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し，第3章では CSN-SS 信号がインパルス応答の測定結果の雑音レベル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．

## 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．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，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．ただし， $k$  は離散周波数番号を示す．

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 $N(k)$ 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」と呼ぶことにする．

このことからわ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．そして，測定信号のスペクトル形状が同じであれば，イ

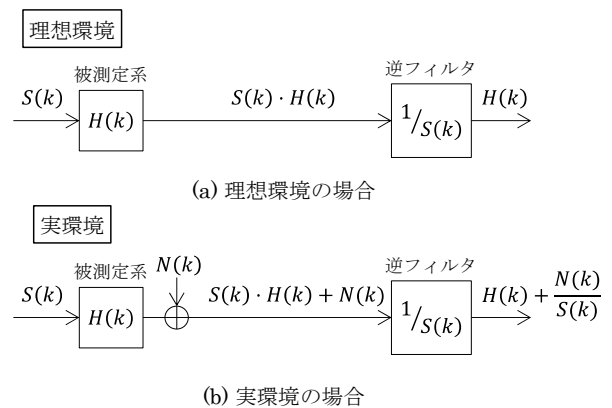


Fig. 1 インパルス応答測定の原理

ンパルス応答波形に含まれる雑音のパワー（単位時間当たりの雑音エネルギー）は測定信号長に反比例して減少する[6]．

### 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または 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2乗積分曲線の傾きより算出される．この時，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の平均パワーレベルとして定義される．Fig. 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  $p$  におけるインパルス応答を  $h_p(n)$ ，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．この時，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)より雑音レベルは帯域毎の雑音の大きさと，帯域毎のインパルス応答の大きさの両方が影響していることがわかる．通常，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る．したがって，音響機器の出力が低下する帯域では雑音レベルの上昇が大きい．また，式(1)の  $\text{mean}(n_p^2(n))$  は雑音成分のパワーを表しており，インパルス応答の測定信号長を伸縮することでその大きさを制御するこ

とができる。

### 2.3 従来信号を用いた時の問題点

実環境における帯域別雑音 $n_p(n)$ 、および帯域別インパルス応答 $h_p(n)$ の大きさは、周波数毎に異なる。したがって固定されたスペクトルを持つ従来の測定信号(TSP信号やLog-SS信号)を用いた場合には、測定結果の雑音レベル $NFL_p$ はFig. 2に示すように帯域ごとに異なって得られる。(100Hz帯域雑音レベルは約-40dBであるのに対し、8kHz帯域では約-60dBとなっている)

Fig. 3にTSP信号を用いた時の63Hz~8kHz測定結果の各帯域別雑音レベルの測定例を示す。残響時間測定においては、対象となる全帯域内(Fig. 3に縦破線で示す帯域)において雑音レベルが-45dB以下であることが求められる(ISO3382,  $T_{30}$ 測定時)。従来の測定信号を用いてこの条件を満たすように測定すると、Fig. 3に示すように、雑音レベルが最大の帯域を除いて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、帯域毎の掃引時間が帯域毎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。本研究ではこの問題に対して、帯域毎の雑音レベルが残響時間測定において求められる雑音レベルで一定となるような測定信号を提案する。

## 3. CSN-SS信号を用いた残響時間測定法

### 3.1 CSN-SS信号の測定原理

測定信号 $S(k)$ を用いて得られた周波数特性の周波数毎のSN比は、目的とする周波数特性 $H(k)$ とFig. 1に示した雑音成分 $N(k)/S(k)$ のパワー比として、

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

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。

一方、各周波数において所望のSN比を $D_{SN}(k)$ と表し、これを式(2)の $SN(k)$ に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

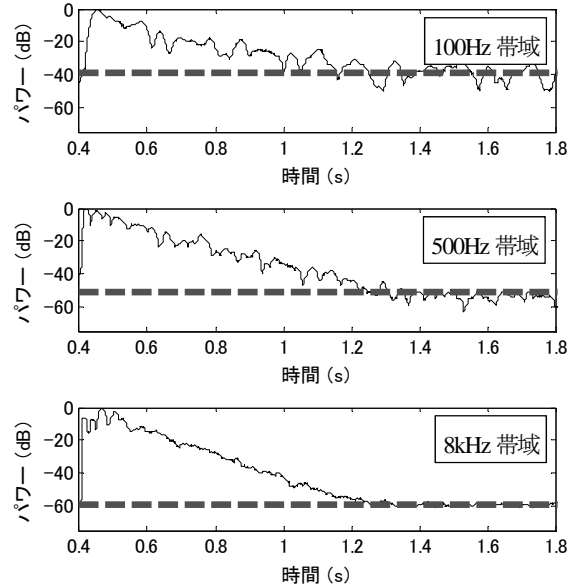


Fig. 2 TSP信号を用いて測定した帯域別インパルス応答の短時間パワー特性の例 (破線は雑音レベルを示す)

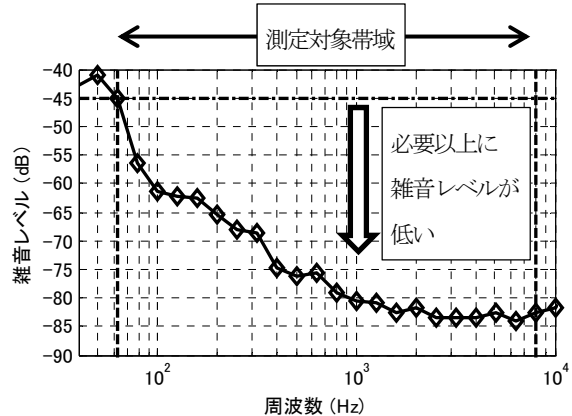


Fig. 3 TSP信号を用いた時の測定結果の帯域別雑音レベルの例

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

が得られる。この式は測定環境の雑音と系の周波数特性により表される式(3)の測定信号を用いて測定すれば所望のSN比 $D_{SN}(k)$ での測定が可能であることを表す。

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、簡単な事前測定を行い、その予測値 $\hat{H}(k)$ を用いて $|S(k)|^2$ の計算を行う。これがCSN信号におけるSN比制御原理である。

### 3.2 一定の雑音レベルとするために 必要な SN 比

前項における  $D_{SN}(k)$  を対象とする帯域において一定値とすれば、対象帯域で SN 比を一定とした周波数特性が測定される[7]。しかし、2.3 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。

Fig. 4 に帯域別インパルス応答と雑音成分の短時間パワーのモデル図を示す。帯域別インパルス応答は最大値が 0dB となるように正規化しており、雑音レベルは -45dB である場合を示している。図より、最大値を正規化した時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わかる。一方、雑音は -45dB 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、各帯域の所望 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エネルギーの比として

$$D_{SN}(p) = E_p / E_N : p = 1, 2, \dots \quad (4)$$

と設定すれば Fig. 4 のように帯域によらず一定 (-45dB) 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 -45dB とするための  $D_{SN}(p)$  を「必要 SN 比」と呼ぶ。

ただし残響時間測定に不必要な帯域の 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 -20dB 程度[7] とした予備測定により求める。この場合、雑音レベルを -45dB 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。

### 3.3 必要 SN 比を実現するための信号長

Fig. 5 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、

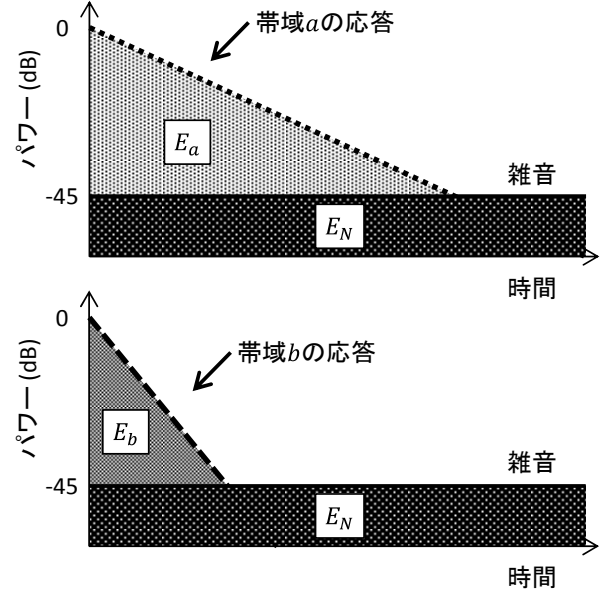


Fig. 4 帯域別インパルス応答と雑音の短時間パワーモデル

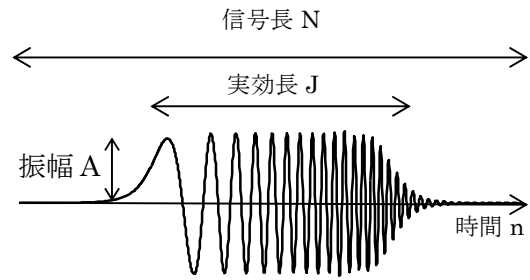


Fig. 5 掃引正弦波(SS)信号の時間波形

$$E_s = \sum_{n=0}^{N-1} |s(n)|^2 = \frac{A^2}{2} \cdot J \quad (5)$$

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[8]が成立する。

$$\sum_{n=0}^{N-1} |s(n)|^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} |S(k)|^2 \quad (6)$$

式(6)に式(3)(5)を代入して整理すれば、

$$J = \frac{2}{A^2} \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} D_{SN}(k) \cdot \frac{P_N(k)}{|H(k)|^2} \quad (7)$$

の関係が得られる。ただし、式(7)右辺の

$$\frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} D_{SN}(k) \cdot \frac{P_N(k)}{|H(k)|^2} \quad (8)$$

は、周波数軸上での平均値を表すものであるため、離散周波数の数 $N$ にはあまり影響されない。この事をふまえて、式(7)の $N$ としては予備測定時の信号長 $\hat{N}$ を用い、また $H(k)$ としては予備測定値 $\hat{H}(k)$ を用いる。 $A^2$ 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(4)で帯域 $p$ ごとに計算された所望SN比 $D_{SN}(p)$ を対応する離散周波数 $k$ で表したものが与えられると、必要な掃引正弦波信号の実効長 $J$ が求められる。

### 3.4 提案する残響時間測定法

Fig. 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、Fig. 6に従って測定手順を説明する。

- ① 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)
- ② 被測定系のインパルス応答およびそのDFTである周波数特性 $\hat{H}(k)$ を予備測定する。測定には雑音を最小化する測定信号[9]やLog-SS信号などの既存信号を利用する。3.2項で述べたようにこの測定は本測定に比べて短時間で終わる。
- ③ 予備測定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。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とした時のSN比(必要SN比 $D_{SN}(k)$ )を求める。
- ④ 得られた事前測定の結果を用い、式(7)より必要な信号の実効長 $J$ を計算し、その1.3~2倍の信号長 $N$ でCSN-SS信号を合成する。CSN-SS信号のパワースペクトルは式(3)の $H(k)$ を予備測定値で置き換えた次式

$$|S(k)|^2 = D_{SN}(k) \cdot \frac{P_N(k)}{|\hat{H}(k)|^2} \quad (9)$$

で求める。ただしこの式における $P_N(k)$ 、 $\hat{H}(k)$ は予備測定の信号長 $\hat{N}$ で求めたスペクトルを④で得た本測定の信号長 $N$ のスペクトル表した

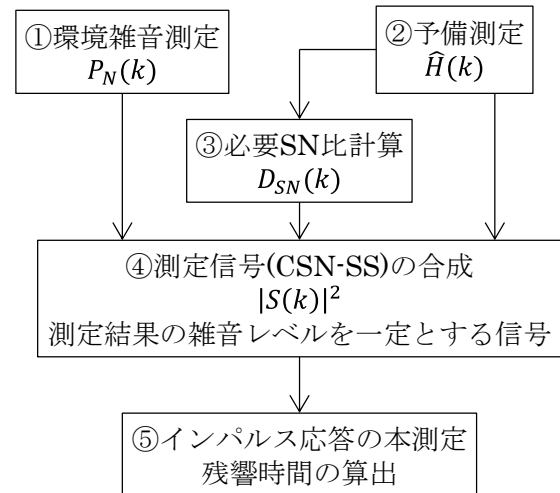


Fig. 6 提案する残響時間測定法

ものを用いる。

- ⑤ 合成した信号を用いてインパルス応答の本測定を行う。この結果得られるインパルス応答の雑音レベルは $-45$  dBとなっている。得られた応答をフィルタリングし、各帯域の応答とする。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。

以上のような手順で測定を行う。

## 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実験は多目的ホール(室容積 約 $3300$   $m^3$ )で測定を行った。Fig. 7に測定環境における雑音の周波数スペクトルを示す。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。Fig. 8に使用したスピーカ、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中心周波数 $400$  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代表的な測定信号であるTSP信号、Log-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(7)で得られた実効長 $J$ の値は $2^{16}$ で、信号長 $N$ は $2^{17}$ とした。サンプリング周波数は $48$  kHzとしたので、 $J = 1.4$ 秒、 $N = 2.7$ 秒となる。

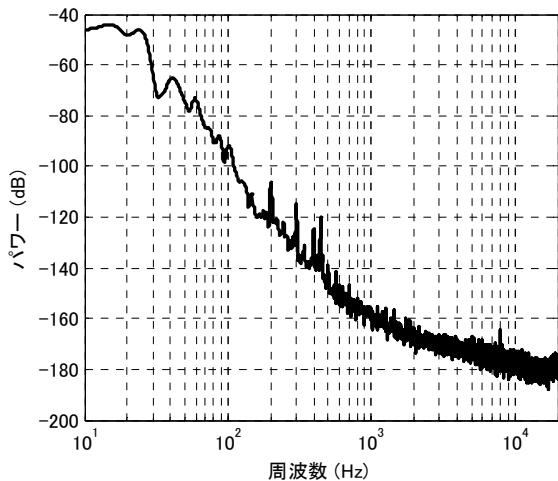


Fig. 7 測定環境における雑音の周波数スペクトル

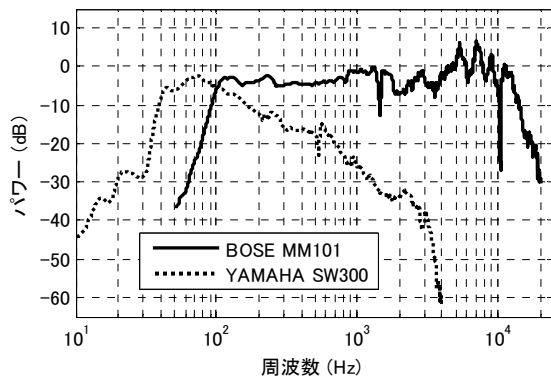


Fig. 8 使用したスピーカ、ウーファの周波数応答特性

Fig. 9 に実験に使用した測定信号 3 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低域の SN 比は著しく低下する。したがって、対象帯域内で  $-45\text{dB}$  の雑音レベルという測定条件を満たすために CSN-SS 信号の合成結果は従来の測定信号に比べ特に低域の掃引時間が長くなっている。

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  $63\sim 8000\text{Hz}$  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および残響時間を求めた。

Fig. 10 には各測定信号を用いて得られた測定結果のインパルス応答を示す。CSN-SS 信号により得られた結果は雑音が多く含まれるように見えるが、こ

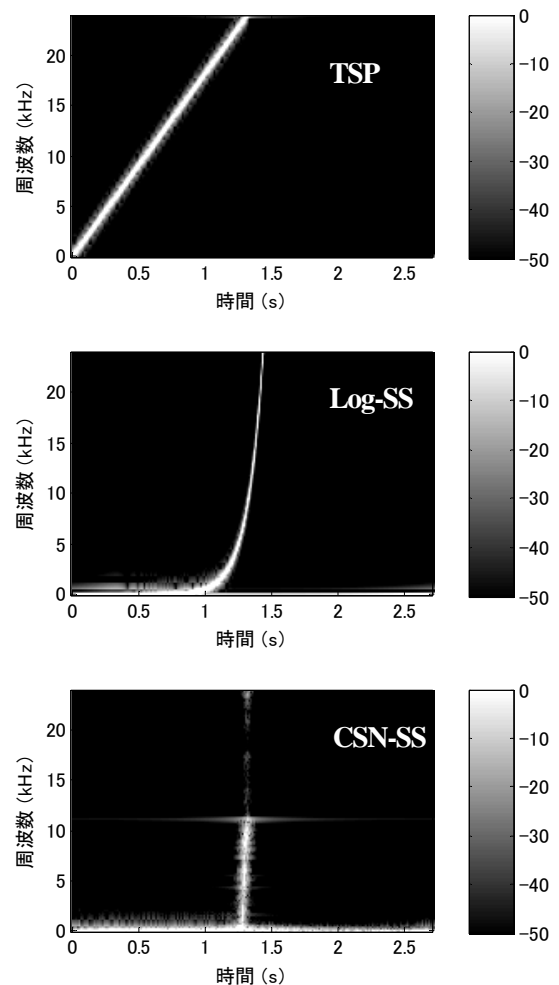


Fig. 9 使用した各種測定信号のスペクトログラム

れは残響時間測定対象の対域以外の雑音が多く含まれているためである。

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 Fig. 11 に示す。Fig. 2 に示した TSP 信号の測定結果と比較した時、いずれの帯域でも雑音レベルがほぼ  $-45\text{dB}$  で一定となっていることが確認できる。

Fig. 12 に CSN-SS 信号によって測定されたインパルス応答と、含まれる雑音成分の周波数特性を示す。提案法では図のように測定対象となる帯域内では必要な最小限の SN 比を確保し、それ以外の帯域は低 SN 比とすることで時間的に効率的な測定を行う。ただし、測定対象帯域外であっても対象帯域の近傍の周波数は帯域通過フィルタの遷移特性によって対象帯域に悪影響を及ぼすので、近傍周波数の雑音成

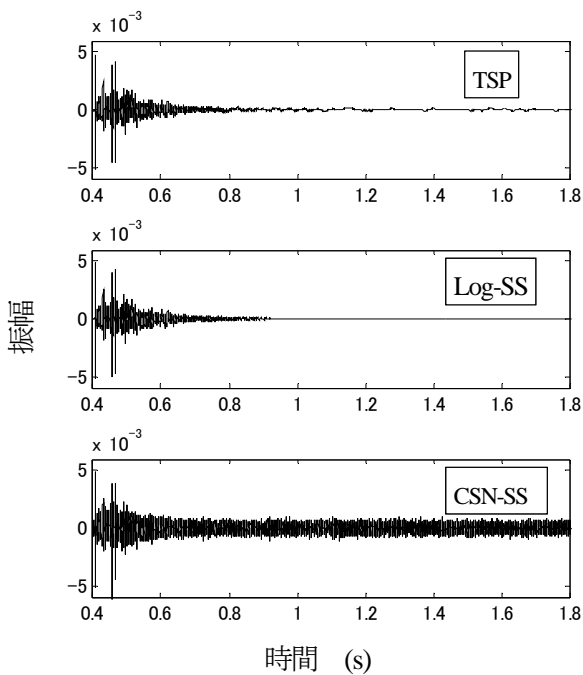


Fig. 10 各測定信号を用いて得られたインパルス応答

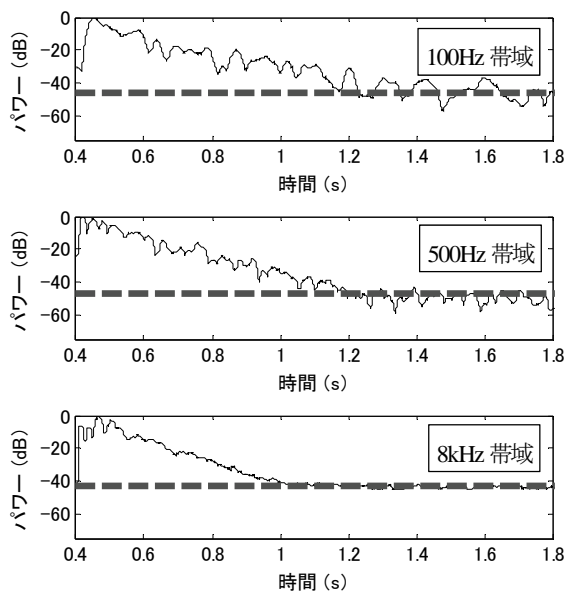


Fig. 11 CSN-SS 信号を用いて得られた帯域別インパルス応答の短時間パワー特性 (破線は雑音レベルを示す)

分は抑圧を行っている。

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 Fig. 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(○印)は、測定対象となる帯域 (縦破

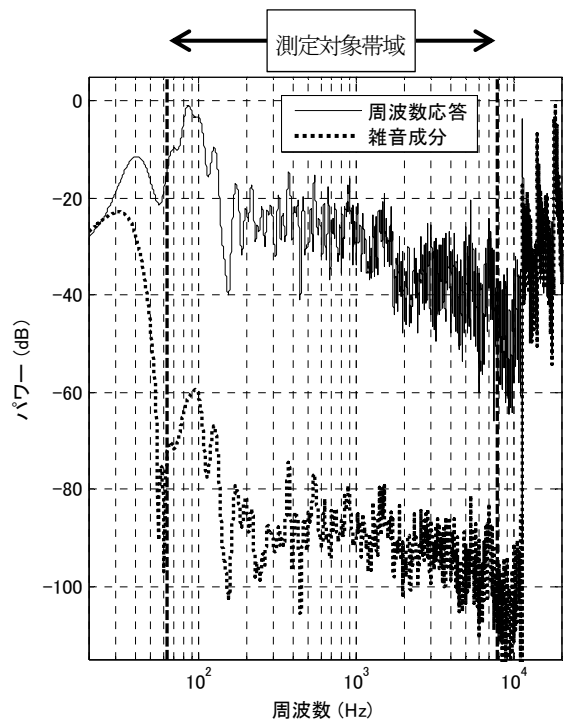


Fig. 12 CSN-SS 信号を用いて測定されたインパルス応答の周波数特性と雑音成分の周波数特性

線内側: 63Hz~8kHz) で、 所望される雑音レベル  $-45\text{dB}$  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 信号の測定結果は、雑音レベルが帯域毎に大きく異なる。また、雑音レベルが  $-45\text{dB}$  を上回る帯域が存在し、残響時間の算出には不適である。

Log-SS 信号の結果に注目すると、最低周波数 (63Hz) のみで雑音レベルが、  $-45\text{dB}$  を上回っている。その大きさは約  $8\text{dB}$  であるが「対象とする全帯域で雑音レベルを  $-45\text{dB}$  以下とする」という条件を満たすためには、全体の雑音レベルを  $8\text{dB}$  下げ必要がある。そして、そのためには信号長を 6 倍にする必要がある。すなわち、Log-SS 信号の場合、CSN-SS 信号より 6 倍の測定時間が必要となる。

一方、100Hz 以上の帯域では、Log-SS 信号は CSN-SS 信号よりも低い雑音レベルを実現しているが、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。

仮に、63Hz のみを  $-35\text{dB}$  の雑音レベルから求める  $T_{20}$  を採用すると、Log-SS 信号はこの信号長でも十分となる。しかし、CSN-SS 信号も同様に 63Hz

帯域が $-35\text{dB}$ の雑音レベルでよいとする場合には、式(7)で計算される信号実効長は $1/4$ に短縮される。この差は高域の無駄な（過剰に低雑音レベルの帯域の）掃引時間が短縮されるからである。

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 Fig. 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。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. まとめ

本報告では測定結果の SN 比を任意に制御できるインパルス応答測定用信号、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 比を求める。そして、その帯域別 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ことで、従来のインパルス応答測定用信号に対して短時間で効率的な残響時間測定が可能である。実音場実験の結果、本測定手法は Log-SS 信号を用いた場合と比べて約  $1/6$  の測定時間で正しく残響時間を算出することができた。

## 参考文献

[1] ISO 3382-1:2009(E), Acoustics - Measurement of room acoustics parameters – Part 1:Performance spaces  
 [2] 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).  
 [3] 金田豊, "M 系列信号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).  
 [4] 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

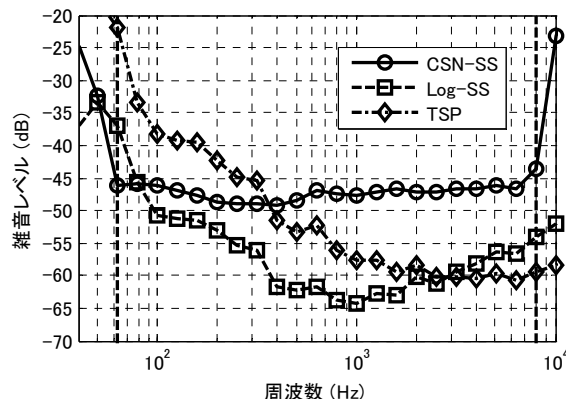


Fig. 13 各測定信号の測定結果の帯域別雑音レベル

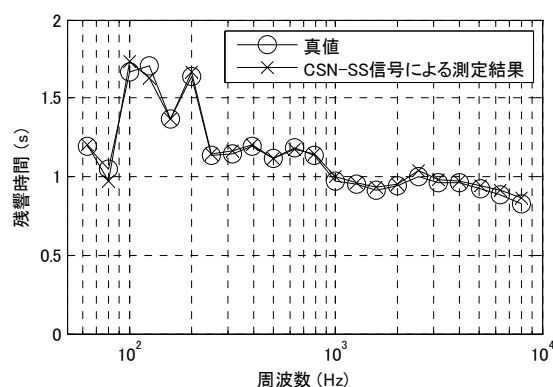


Fig. 14 残響時間算出結果

—," 音講論春 555-556 (2000).  
 [5] 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).  
 [6] Y. Kaneda, "Noise Reduction Performance of Various Signals for Impulse Response Measurement." J. Audio Eng. Soc., Vol. 63, no. 5, pp. 348-357 (2015 May).  
 [7] 中原, 金田, "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).  
 [8] 足立修一, MATLAB によるデジタル信号とシステム, pp. 83, 東京電機大学出版 (2002)  
 [9] 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).