

残響時間測定における BMN-SS インパルス応答測定法の有効性について

飯山陽平[†] 金田 豊[‡]

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

E-mail: [†]18kmc04@ms.dendai.ac.jp, [‡]kaneda@mail.dendai.ac.jp

あらまし 残響時間は対象とする室内のインパルス応答から算出される。このとき、各オクターブバンドでのインパルス応答測定結果について、雑音成分の定常パワーがインパルス応答瞬時パワーの最大値よりも -45dB 以下であることが測定条件と定められている。しかし、TSP 信号などの従来インパルス応答測定信号を用いた場合は、測定結果の雑音レベルが周波数帯域によって異なる。そのため、全帯域に渡って条件を満たすには長時間の測定が必要であった。そこで、筆者らは測定結果の各オクターブバンド雑音レベルの制御を行える Band-wise Minimum Noise Swept Sine (BMN-SS) 信号を提案した。この BMN-SS 信号を利用して残響時間の測定を行った結果、今回の実験条件では、TSP 信号の約 $1/200$ 、Log-SS 信号の約 $1/4$ の測定時間短縮を確認した。

キーワード 残響時間測定, インパルス応答, 掃引正弦波信号, オクターブバンド, 雑音レベル

Effectiveness of BMN-SS impulse response measurement method for reverberation time measurement

Yohei Iiyama[†] and Yutaka Kaneda[‡]

Graduate school of Engineering, Tokyo Denki University,

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

E-mail: [†]18kmc04@ms.dendai.ac.jp, [‡]kaneda@mail.dendai.ac.jp

Abstract The reverberation time is calculated from a room impulse response. In this case, the steady power level of the noise component is required to be less than -45 dB relative to the maximum instantaneous power of the impulse response in each octave band. However, when using a conventional impulse response measurement signal such as a TSP signal, the noise level depends on the frequency band. For this reason, a measurement using a long-time signal is necessary to satisfy the required noise level in all frequency bands. Therefore, we proposed a band-wise minimum noise swept sine (BMN-SS) signal that can control the noise level of each octave band in the measurement result. In this paper, we present the method of shortening the measurement time of the reverberation time using this BMN-SS signal and the measurement results in a real sound field. Using the BMN-SS signal, we confirmed the measurement time shortening by $1/200$ of TSP signal and $1/4$ of the Log-SS signal under the experimental condition stated in this paper.

Key words reverberation time measurement, impulse response, swept sine signal, octave band, noise level

1 ま え が き

残響時間は室内の音の響きを示す指標であり、室内音響の基本特性量である。残響時間の測定方法として、対象のインパルス応答から残響曲線を求め、その残響レベルが -5 dB から -35 dB まで減衰する時間の 2 倍の T_{30} を求めるという方法が代表的である。この、残響時間 T_{30} を求める際の測定条件としては、各オクターブバンド（または $1/3$ オクターブバンド）に分割したインパルス応答において、雑音レベルがインパルス応

答瞬時パワーの最大値から -45 dB 以下であることが求められる [1]。しかし、従来の測定信号では、インパルス応答の測定結果の雑音レベルが帯域ごとに異なるため、残響時間の測定条件に対して過剰品質な測定となる帯域が存在し、測定時間の長時間化の要因となっていた。

この問題に対して、筆者らは測定結果のオクターブバンドごとの雑音レベルを制御できる Band-wise Minimum Noise Swept Sine (BMN-SS) 信号を提案した [2]。本報告では、実音場環境においてこの BMN-SS 信号を利用して残響時間測定を行い、そ

の有効性を検討する。

2 インパルス応答測定原理

インパルス応答の測定では SN 比を向上させるためにエネルギーを大きくした測定信号を利用する。図 1 に、測定信号を用いたインパルス応答測定の原理を周波数領域において示す。ただし、 k は離散周波数番号である。まず、周波数スペクトル $S(k)$ で表される測定信号を被測定系 $H(k)$ に入力すると、その出力は $S(k) \cdot H(k)$ となる。この出力に対して、測定信号の逆の特性 $1/S(k)$ を持つ逆フィルタをかけることで、インパルス応答と等価である、被測定系の周波数特性 $H(k)$ を得ることができる。しかし、実際の測定では環境雑音 $N(k)$ が系の出力に含まれるため、最終的に得られる測定結果にはインパルス応答成分である $H(k)$ に対し、 $N(k)/S(k)$ で表される雑音成分が付加される。この雑音成分 $N(k)/S(k)$ は測定信号の周波数スペクトル $S(k)$ に依存する。

インパルス応答成分 $H(k)$ は固定であるから、インパルス応答の測定精度を向上させるためには、雑音成分 $N(k)/S(k)$ の影響を小さくすればよい。そのためには、周波数スペクトル $S(k)$ の形状を適切に定めること、および測定信号長を長くすることが有効であると知られている [3]。

図 2 に、測定信号に広く利用される掃引正弦波信号 (Swept Sine Signal) のモデル図を示す。掃引正弦波信号とは一定の振幅を持ち、時間とともに周波数が上昇する信号である。掃引正弦波で測定したインパルス応答の雑音成分は図 2 の実効長 J に反比例して減少する。

3 従来の測定信号の問題点

TSP 信号や、Log-SS 信号などの従来の測定信号を用いた場合、インパルス応答測定結果の雑音レベルは各オクターブバンドで異なってしまふ。例として、図 3 に TSP 信号を用いて測定したときの 125 Hz、1000 Hz、8000 Hz 帯域のインパルス応答瞬時パワー波形を示す。ただし、図の破線は雑音レベルに対する要求条件である -45dB の雑音レベルを表している。

図 3 に示すように、測定結果の雑音レベル (図の時間後半部分) は周波数帯域ごとに異なっている。このように、従来の測定信号を用いて、全ての雑音レベルが -45dB 以下になるように測定した場合、雑音レベルが過剰に小さい測定帯域 (例えば図 3 の (b), (c)) が発生する。

掃引正弦波信号を用いた測定において、ある帯域の雑音レベルが過剰に小さいということは、該当の帯域に対する掃引時間が必要以上に長いことを意味する。従って、全てのオクターブバンドの雑音レベルが要求条件である -45dB となり、過小な雑音レベルの帯域を生じない測定信号を合成できれば、測定時間の短縮が期待できる。以下では、そのような信号の合成を目的とする。

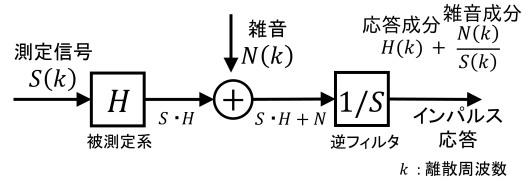


図 1 インパルス応答測定原理 (周波数表現)

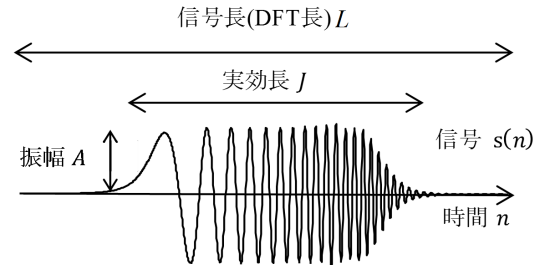


図 2 掃引正弦波信号のモデル図

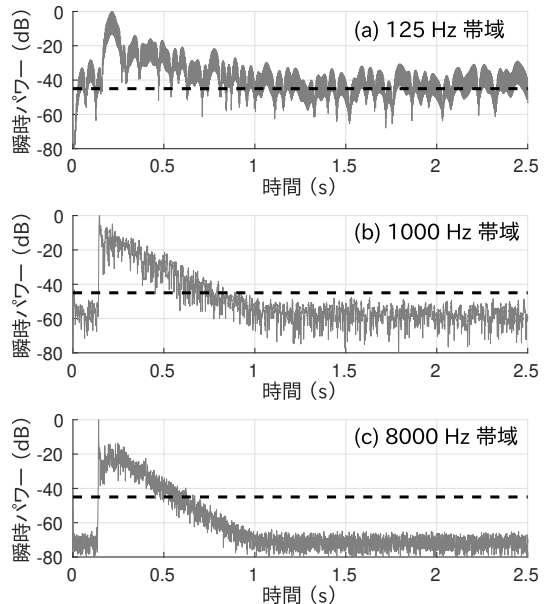


図 3 TSP 信号を用いて測定された帯域別インパルス応答瞬時パワー

4 帯域別の雑音レベルを一定とする測定信号

4.1 残響時間測定に要求される SN 比

第 1 章で述べたとおり、残響時間測定の要求条件は各帯域で分割したインパルス応答瞬時パワーの雑音レベルが -45dB 以下であることだった。図 4 に、この測定条件を満たした p 番目のオクターブバンド f_p のインパルス応答瞬時パワーのモデル図を示す。インパルス応答瞬時パワーの最大値を 0dB として正規化した。このときの応答のエネルギー (瞬時パワーの総和であり、図の面積として表される) を $E_H(p)$ と表す。この $E_H(p)$ の面積はインパルス応答瞬時パワーの傾き (減衰率) によって異なるため、各オクターブバンド f_p によって異なる。

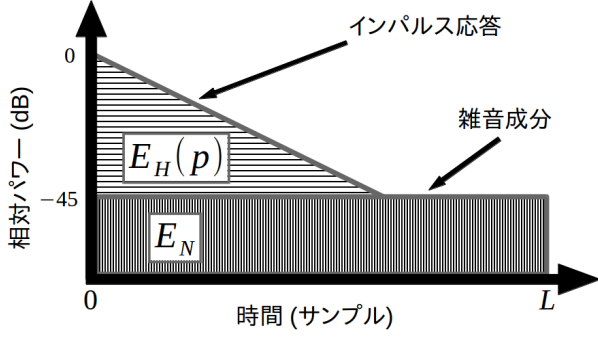


図4 残響時間の測定条件を満たす帯域 f_p のインパルス応答瞬時パワーのモデル図

一方、定常な雑音成分は -45 dB のパワーが信号長 L 継続しているとすると、そのエネルギー E_N (面積) はどのオクターブバンドに対しても一定の $10^{-4.5} \cdot L$ として表せる。よって、雑音レベル -45 dB である場合の第 p 番目のオクターブバンドの SN 比 $D_{SN}(p)$ は次の式のように表される。

$$D_{SN}(p) = \frac{E_H(p)}{E_N} = \frac{E_H(p)}{10^{-4.5} \cdot L} \quad (1)$$

4.2 各周波数成分の雑音レベルを一定とする信号 (CSN-SS)

図1から、インパルス応答測定結果の各離散周波数番号 k ごとの SN 比 $SN(k)$ は、応答成分と雑音成分のパワーの比として、次のように表せる。

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

このとき、SN 比が $D_{SN}(p)$ 、すなわち雑音レベルが -45 dB である場合の SN 比であるすると、次式の関係が成立する。

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

ただし、 D_{SN} の変数は k を用いて表した。これを、測定信号のパワースペクトル $|S(k)|^2$ について解くと、次が求められる。

$$|S(k)|^2 = D_{SN}(k) \cdot \frac{|N(k)|^2}{|H(k)|^2} \quad (4)$$

このパワースペクトルを持つ測定信号により測定したインパルス応答は、各周波数番号 k において、SN 比 $D_{SN}(k)$ を実現し、対象の周波数帯域全体で -45 dB 一定の雑音レベルを実現する。よって、従来の測定信号の問題点であった雑音レベルが過小となる帯域がなく、測定時間の短時間化が行える。

この信号は Controllable Signal-to-Noise Ratio Swept Sine (CSN-SS) 信号と呼ばれる [5]。ただし、環境雑音および系の応答の周波数スペクトル $N(k)$ 、 $H(k)$ は未知であるため、簡易的な事前測定による推定値を利用する。

4.3 任意の帯域別雑音レベルを与える最短の測定信号 (BMN-SS)

CSN-SS 信号は、各オクターブバンドにおいて必要な SN 比 $D_{SN}(p)$ を各周波数成分 k において実現するものであった。こ

れに対して、本稿で提案する方法は必要な SN 比を各オクターブバンドにおいて実現する。すなわち、提案法は「個々の周波数の」SN 比を制御するのではなく、もう少し広い「オクターブバンドの」SN 比を制御することでより自由度の大きい信号スペクトル設定を可能とする。その結果、より短時間での測定を可能とする。

第 p オクターブバンド f_p における SN 比は次式で表される。

$$SN(p) = \frac{\sum_{k \in f_p} |H(k)|^2}{\sum_{k \in f_p} \{|N(k)|^2 / |S(k)|^2\}} \quad (5)$$

ただし、総和は第 p オクターブバンドに含まれる周波数で行われる。よって、パワースペクトル $|S(k)|^2$ が満たすべき式は次式で表現される。

$$SN(p) = D_{SN}(p) = \frac{\sum_{k \in f_p} |H(k)|^2}{\sum_{k \in f_p} \{|N(k)|^2 / |S(k)|^2\}} \quad (6)$$

上式を満たす $|S(k)|^2$ は多数の解が存在するが、提案方法では雑音レベルを最小化する (= 必要な雑音レベルを最短の信号長で実現する) 次のパワースペクトル [6] を採用する。

$$|S(k)|^2 = C_p \cdot |N(k)| \quad (k \in f_p, p = 1, 2, 3, \dots) \quad (7)$$

ただし、 $|N(k)|$ は環境雑音の振幅スペクトルを表す。また、 C_p は帯域 p に依存する定数で以下のように求める。

式 (7) で表される測定信号で測定したときの SN 比は式 (5) に式 (7) を代入して次のように求められる。

$$SN(p) = C_p \cdot \frac{\sum_{k \in f_p} |H(k)|^2}{\sum_{k \in f_p} |N(k)|} \quad (8)$$

式 (8) で表される SN 比を要求 SN 比とおく。すなわち、 $SN(p) = D_{SN}(p)$ とおいて、 C_p について解くと次のように求められる。

$$C_p = D_{SN}(p) \cdot \frac{\sum_{k \in f_p} |N(k)|^2}{\sum_{k \in f_p} |H(k)|^2} \quad (9)$$

式 (7) に式 (9) を代入して得られる

$$|S(k)|^2 = D_{SN}(p) \cdot \frac{\sum_{k \in f_p} |N(k)|^2}{\sum_{k \in f_p} |H(k)|^2} \cdot |N(k)| \quad (10)$$

をパワースペクトルとして持つ測定信号により測定したインパルス応答は、各オクターブバンドにおいて、式 (1) で表された SN 比 $D_{SN}(p)$ を実現し、 -45 dB の雑音レベルを実現する。そして、個々のオクターブバンドに対して、雑音最小化信号 (MN 信号) のスペクトルを与えることで、各オクターブバンドで最小時間の信号を実現する。その結果、対象の周波数帯域全体で -45 dB 一定の雑音レベルを実現する最短の信号長のイン

パルス応答測定信号を得る。この信号を Band-wise Minimum Noise Swept Sine(BMN-SS) 信号と呼ぶ。

ただし、CSN-SS 信号と同様に $N(k)$, $H(k)$ は簡易的な事前測定を行って推定値を求める。

4.4 実効長 J の算出

雑音レベルを -45dB とする信号のパワースペクトル $|S(k)|^2$ は式 (10) で与えられ、BMN-SS 信号 $s(n)$ は、このパワースペクトルを持つ掃引正弦波信号として合成される。しかし通常、DA 変換器や再生音圧には上限値があるため、計算された $|S(k)|^2$ の大きさを実現するためには、測定信号の実効長 J を適切に定める必要がある。

実現可能な掃引正弦波の振幅を A としたとき、実効長が J の掃引正弦波信号 $s(n)$ のエネルギー E_s は次式で表される。

$$E_s = \sum_{n=0}^{L-1} |s(n)|^2 = \frac{A^2}{2} \cdot J \quad (11)$$

ただし、 L は図 1 に示すように信号振幅がほぼ 0 となる区間も含めた全信号長である。ここで、時間波形 $s(n)$ とその離散スペクトル $S(k)$ の間に次式のパーセバルの関係 [4] が成立する。

$$\sum_{n=0}^{L-1} |s(n)|^2 = \frac{1}{L} \cdot \sum_{k=0}^{L-1} |S(k)|^2 \quad (12)$$

式 (12) の左辺に式 (11) に代入し、 J について解けば次が求められる。

$$J = \frac{2}{A^2} \cdot \frac{1}{L} \cdot \sum_{k=0}^{L-1} |S(k)|^2 \quad (13)$$

以上より、測定信号の実効長 J が計算できる。ただし、式 (13) の L には、 $H(k)$ の事前測定に用いた信号長 \hat{L} を代用する。右辺は、 $k = 0 \sim L-1$ について加算して L で割る平均操作を行っているため L の値を \hat{L} としても大きな差は生じない。

5 BMN-SS 信号の合成・測定手順

図 5 に、BMN-SS インパルス応答測定法を利用した残響時間測定方法の流れを示す。式 (1),(9) から分かるように、BMN-SS 信号のパワースペクトルを決定するには、環境雑音、系の応答それぞれの周波数スペクトル $N(k)$, $H(k)$ を求める必要がある。そのため、BMN-SS 信号の合成を行うには予め環境雑音と系の応答を簡易的に事前測定する。このとき、環境雑音の測定時間は 1 秒間程度、また、系の応答の推定値 $\hat{H}(k)$ を求めるための測定時間は本測定の $1/100$ 程度で十分である [5]。

6 実音場実験

BMN-SS インパルス応答測定法の有効性を確認するために、室内の残響時間測定を行った。また、雑音レベル制御効果の比較のために、同環境にて従来の測定信号である TSP, Log-SS 信号を用いた測定も行った。このとき、TSP, Log-SS 信号の振幅と信号長は、BMN-SS 信号と同じ値とし、各測定信号のエネルギーを等しくした。

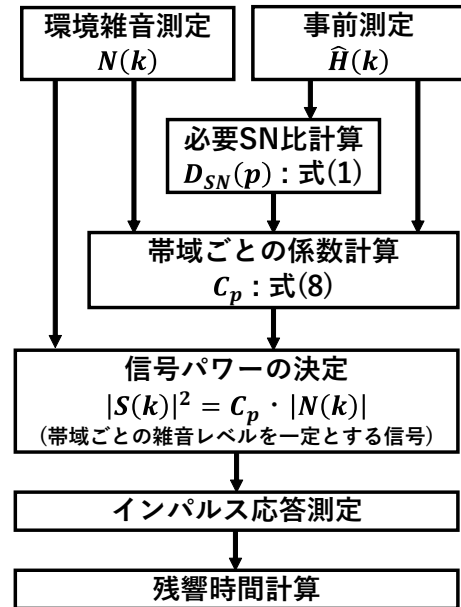


図 5 BMN-SS 信号の合成・測定手順

表 1 実験条件

サンプリング周波数	48000 Hz
測定信号	TSP, Log-SS, CSN-SS, BMN-SS
測定信号音圧レベル	1 m の距離で 70 dB
対象の周波数帯域	50 ~ 10000 Hz
帯域分割	1/3 オクターブ
部屋容積	460 m ³ (講義室)
スピーカ	BOSE MM-101
サブウーファ	YAMAHA NS-SW300
背景雑音レベル	39 dB(A), 61 dB(Z)

6.1 実験条件

実験条件を表 1 に示す。また、測定機器の配置図を図 6 に、接続図を図 7 に示す。BMN-SS 信号の合成に当たっては環境雑音の録音に約 1.0 秒、系の応答の事前測定に約 2.7 秒、合成時間に約 0.8 秒の、合計約 4.5 秒を要した。事前測定により得られた環境雑音、系の応答それぞれのパワースペクトル $|N(k)|^2$, $|H(k)|^2$ を図 8, 9 に示す。

6.2 実験結果

本環境において、BMN-SS インパルス応答測定法に必要な信号長は 665696 サンプル (≈ 13.9 秒) であった。図 10 に合成された BMN-SS 信号のスペクトログラムを、図 11 に BMN-SS 信号にて測定したインパルス応答時間波形を示す。図 12 に BMN-SS 信号を用いて測定したときの 125 Hz, 1000 Hz, 8000 Hz 帯域のインパルス応答瞬時パワー波形を示す。また、図 13 に BMN-SS 信号および、従来法である TSP 信号, Log-SS 信号を用いて測定したインパルス応答についての、1/3 オクターブバンドごとの雑音レベルを示す。

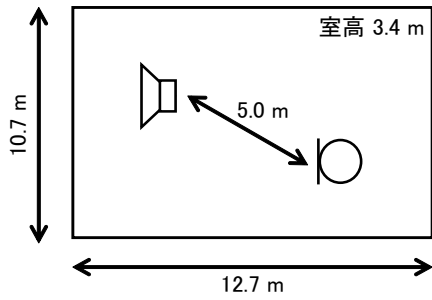


図 6 測定機器配置図

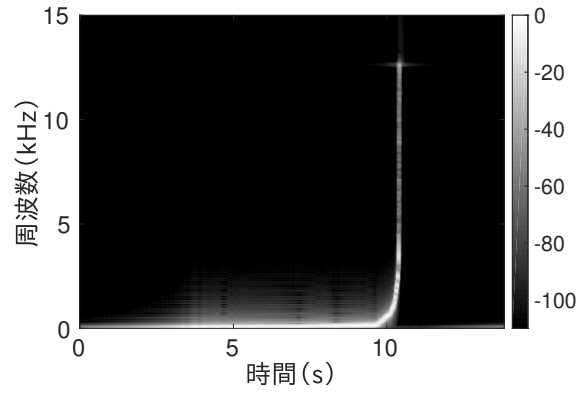


図 10 BMN-SS 信号のスペクトログラム

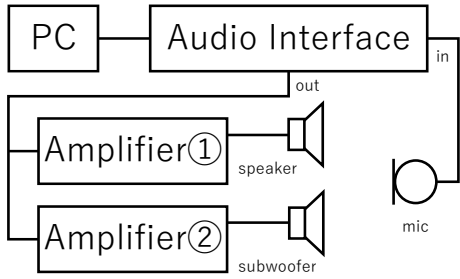


図 7 測定機器接続図

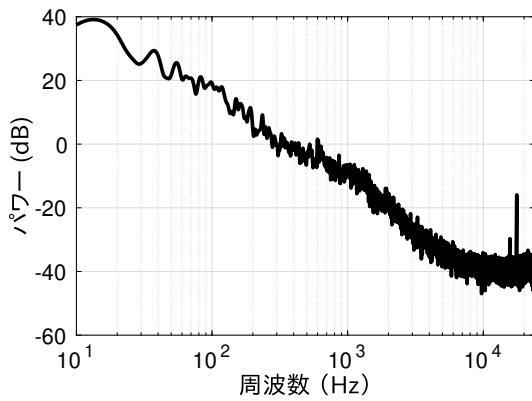


図 8 環境雑音のパワースペクトル $|N(k)|^2$

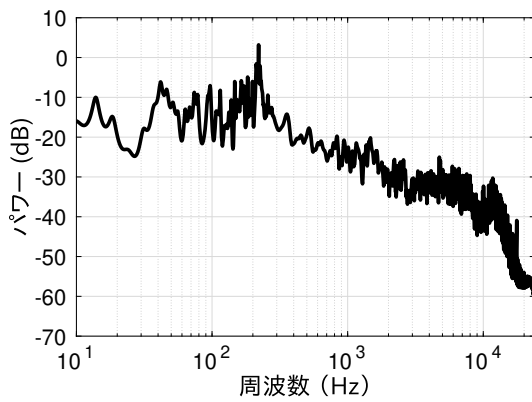


図 9 系の応答のパワースペクトル $|\hat{H}(k)|^2$

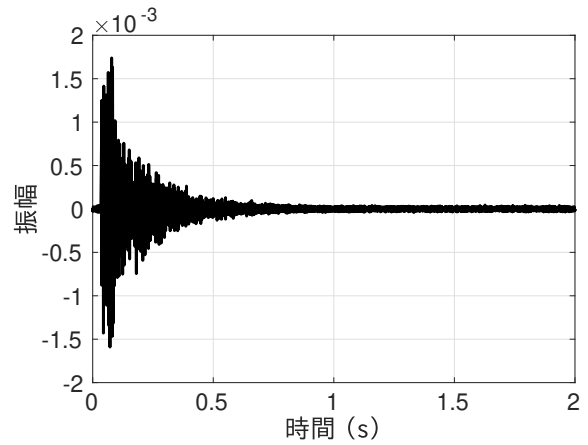


図 11 BMN-SS 信号により測定したインパルス応答時間波形

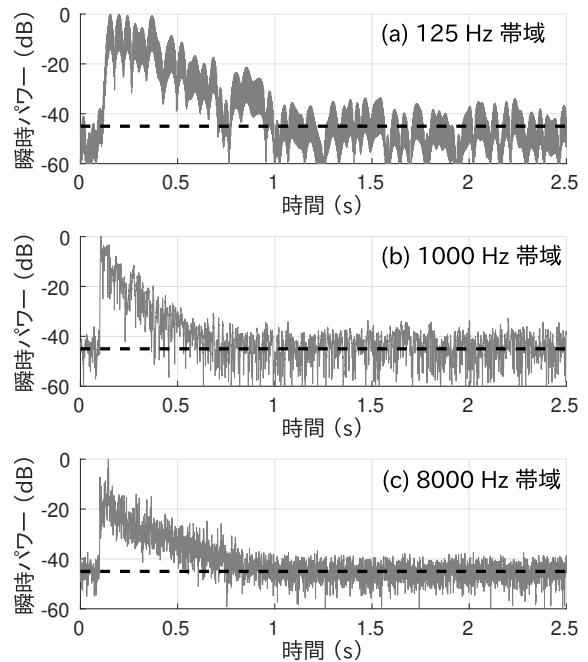


図 12 BMN-SS 信号を用いて測定された帯域別インパルス応答瞬時パワー

6.3 BMN-SS インパルス応答測定法の評価

図 13 より、BMN-SS 信号で測定した結果は、対象とする周波数帯域である 50 Hz ~ 10000 Hz において雑音レベルがほぼ -45 dB 一定に制御されており、このインパルス応答は残響曲線の測定条件を満たしていることが分かる。

対して、同エネルギーで測定している TSP 信号および Log-SS 信号の測定結果を見ると、高周波数帯域では雑音レベルが -45 dB よりも大きく下回っており、残響時間算出の観点からは過剰品質な測定結果となっていることが分かる。また、低周波数帯域では雑音レベルが -45 dB より大きい測定結果となっているため、残響時間の測定条件を満たしていない。各測定信号による対象帯域内での最大の雑音レベルを表 2 に示す。

TSP 信号、および Log-SS 信号を用いて残響時間の測定条件を満たすためには、表 2 で示した最大雑音レベルが -45 dB になるように信号長を伸ばさせて、エネルギーを増加させる必要がある。TSP 信号の場合、エネルギーを $45.0 - 20.5 = 24.5$ dB、真数値で約 281 倍に増加させる必要がある。そのため、TSP 信号の信号長を BMN-SS 信号の 281 倍とし、 $13.9 \times 281 \approx 3920$ 秒にする必要がある。同様に、Log-SS で測定条件を満たした測定を行うには、エネルギーを $45.0 - 38.2 = 6.8$ dB、真数値で約 4.8 倍に増加させる必要があり、信号長は BMN-SS 信号の 4.8 倍である $13.9 \times 4.8 \approx 66.7$ 秒とする必要がある。

BMN-SS や CSN-SS 信号では事前測定などの事前の準備時間が必要であるが、この準備時間と信号長を合わせた実質的な測定時間を表 3 に示す。

表から分かるように、BMN-SS 信号を利用した残響時間の測定時間は、CSN-SS 信号の約 2/3、Log-SS 信号の約 1/4、TSP 信号の約 1/200 であった。以上から、BMN-SS インパルス応答測定法による残響時間測定は、準備時間を考慮しても従来法と比べて短時間で残響時間 T_{30} の測定を行えることが確認できた。

最後に、BMN-SS 信号を用いて測定した 1/3 オクターブ帯域ごとの残響時間の算出結果を図 14 に示す。このとき、長時間（信号長 87 秒）の Log-SS 信号で測定し、雑音を十分に抑圧したインパルス応答から算出した残響時間を真値として扱っている。図から、BMN-SS 信号による測定で得られた残響時間の算出結果は真値とほぼ同一の結果であることがわかる。

以上より、BMN-SS インパルス応答測定法は、従来の測定信号による測定方法よりも短時間で、同精度の残響時間を測定可能であることが確かめられた。

7 む す び

本報告では BMN-SS インパルス応答測定法を利用した残響時間測定の有効性について検討を行った。実験の結果から、BMN-SS 信号は短時間で従来と同精度の残響時間を測定できることが確認できた。特に、今回の実験条件では BMN-SS 信号で必要な測定時間は、従来法である CSN-SS 信号の 2/3、Log-SS 信号の約 1/4、TSP 信号の約 1/200 に短時間化を行えた。

表 2 各測定信号による対象帯域内での最大雑音レベル

測定信号	最大雑音レベル (dB)
TSP	-20.5
Log-SS	-38.2
BMN-SS	-45.3

表 3 残響時間測定に必要な実質的な時間

測定信号	準備時間 (秒)	信号長 (秒)	測定時間 (秒)
BMN-SS	4.5	13.9	18.4
CSN-SS	4.5	21.7	26.2
Log-SS	0	66.7	66.7
TSP	0	3920	3920

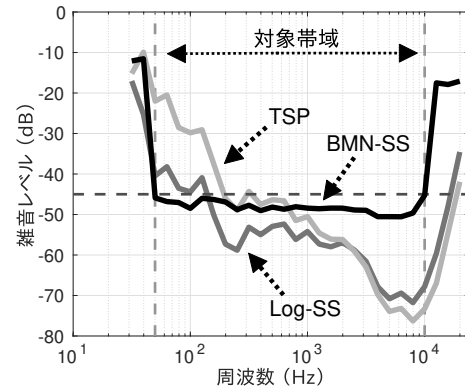


図 13 各測定信号で測定したインパルス応答の帯域別雑音レベル

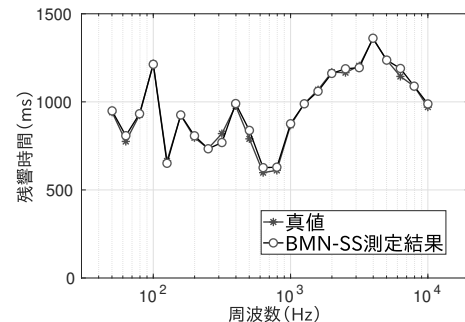


図 14 帯域別の残響時間算出結果

参考文献

- [1] ISO3382-1:2009(E), Acoustics - Measurement of room acoustics parameters - Part 1: Performance spaces, p.6.
- [2] 中原 優樹, 金田 豊, "帯域別雑音レベルを一定とする残響時間測定用信号の改良", 音響学会秋季公演論文集, 2-Q-2 (2016).
- [3] Y.Kaneda, "Noise Reduction Performance of Various Signals for Impulse Response Measurement, "J.AudioEng.Soc., Vol.63, No. 5, pp.348-357, (2015).
- [4] 足立修一, "MATLAB によるデジタル信号とシステム", p.83, 東京電機大学出版 (2002).
- [5] 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", 音響学会春季公演論文集, 1-Q-36 (2015).
- [6] 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", 日本音響学会誌, 64(12), 695-701 (2008).
- [7] 中原 優樹, 金田 豊, "CNS-SS による残響時間効率化の検討", 音響学会春季公演論文集, 1-Q4-7 (2014).