

インパルス応答の測定法と補正法に関する研究

関西大学 環境都市工学部 建築学科
建築環境工学第 1 研究室
建 22-0114 吉田 恵理
指導教員 豊田 政弘

目次

1. 研究背景	1
2. 既往研究	2
2.1 インパルス応答測定における測定系の影響	2
2.2 畳み込みによるシステム表現	2
2.3 周波数領域における補正式	3
2.4 補正法の前提条件と課題	4
3. 研究目的	5
4. 研究方法	6
4.1 使用した機材・ソフト	7
4.2 無響室における測定方法	10
4.3 通常の室での測定方法	12
5. 研究結果	14
5.1 周波数領域における測定結果による考察	14
5.1.1 移動平均化とハニング窓について	14
5.1.2 小型スピーカによる周波数領域の結果	15
5.1.3 大型スピーカによる周波数領域の結果	18
5.1.4 12面体スピーカによる周波数領域の結果	21
5.2 時間領域における測定結果による考察	24
5.2.1 小型スピーカにおける結果	24
5.2.2 大型スピーカにおける結果	25
5.2.3 12面体スピーカにおける結果	25
5.3 まとめ	26
参考文献	27

1. 研究背景

室内音響特性を評価するための代表的な指標の一つとして、インパルス応答が挙げられる。インパルス応答を測定することで、残響時間や初期反射特性など、音源・受音点間に内在する室の音響特性を包括的に把握することが可能である。そのため、建築音響分野において、インパルス応答の測定は重要な役割を担っている。

一般的なインパルス応答測定では、パーソナルコンピュータ（PC）からオーディオインターフェイスを介してスピーカに試験信号を出力し、室内の受音点に設置したマイクロフォンでその応答を記録する方法が用いられる。しかし、実際に得られるインパルス応答には、室の音響特性だけでなく、スピーカやマイクロフォン、オーディオインターフェイスといった測定系そのものが持つ音響特性も含まれてしまう。

本来評価したいのは室固有の音響特性であるが、測定系の特性が重畳することにより、純粋な室のインパルス応答を正確に取得することが困難になるという問題がある。この測定系の影響を適切に除去することは、室内音響評価の精度向上において重要な課題である。

2. 既往研究

2.1 インパルス応答測定における測定系の影響

一般に、音響システムは線形・時不変 (Linear Time-Invariant: LTI) システムとして近似できると考えられている。この仮定のもとでは、入力信号とシステムのインパルス応答との関係は、時間領域において畳み込み積分で表される。室内音響測定において得られる信号は、音源 (オーディオインターフェイス・スピーカ)、測定対象である室、受音系 (マイクروفオン・オーディオインターフェイス) という複数の音響システムが直列に接続された結果であるとみなすことができる。

2.2 畳み込みによるシステム表現

入力信号を $s(t)$ 、出力系のインパルス応答を $h_s(t)$ 、室のインパルス応答を $h_r(t)$ 、受音系のインパルス応答を $h_m(t)$ とすると、受音点で観測される信号 $x(t)$ は次式で表される。

$$x(t) = s(t) \otimes h_s(t) \otimes h_r(t) \otimes h_m(t) \quad (1)$$

ここで \otimes は畳み込み演算を表す。

インパルス応答測定では、入力信号として理想的なインパルス、あるいはそれに準じた信号が用いられるため、入力信号の影響を除去することで、以下の関係が得られる。

$$h_{meas}(t) = h_s(t) \otimes h_r(t) \otimes h_m(t) \quad (2)$$

ここで、 $h_{meas}(t)$ は実測されるインパルス応答である。この式から、 $h_{meas}(t)$ には、室の特性 $h_r(t)$ だけでなく、出力系や受音系などの測定系の特性が含まれていることが分かる。

2.3 周波数領域における補正式

畳み込み定理により、時間領域での畳み込みは周波数領域では積として表される。フーリエ変換を用いて式(2)を周波数領域に変換すると、次式が得られる。

$$H_{meas}(f) = H_s(f) \cdot H_r(f) \cdot H_m(f) \quad (3)$$

ここで、 $H_{meas}(f)$ は実測される周波数応答、 $H_s(f)$ は出力系の周波数応答、 $H_r(f)$ は室の周波数応答、 $H_m(f)$ は受音系の周波数応答である。

既往研究では、無響室において同一の測定系を用いて測定を行うことで、室の影響を含まない測定系全体の周波数応答を取得できるとされている。無響室で得られる伝達関数 $H_{ane}(f)$ は、

$$H_{ane}(f) = H_s(f) \cdot H_m(f) \quad (4)$$

と近似できる[1]。

この関係を用いることで、通常の室内で得られた測定結果を以下のように補正することが可能である。

$$H_r(f) = \frac{H_{meas}(f)}{H_{ane}(f)} \quad (5)$$

この式は、周波数領域において測定系の影響を除去し、室の周波数応答を抽出するための補正式として、既往研究において提案されている。

2.4 補正法的前提条件と課題

この補正法は、測定系および室が線形・時不変システムとして近似できること、ならびに無響室測定によって測定系の特性が正確に取得できることを前提としている。しかし、周波数領域における割り算処理では、測定系の周波数応答が極端に小さい帯域において数値的不安定性が生じる可能性がある。また、補正後の周波数応答を逆フーリエ変換して時間領域に戻した際、リングングなどの不自然な波形が発生することも指摘されている。そのため、既往研究で提案されている補正法の妥当性や限界については、実測結果に基づいた検討が必要である。

3. 研究目的

本研究では、インパルス応答の測定法において、測定系の影響をどのように補正すべきかを明らかにすることを目的とする。特に、既往研究において提案されている周波数領域での補正法について、その妥当性を検討する。

具体的には、無響室および通常の室内で測定したインパルス応答を用い、補正処理によって測定系の特性がどの程度除去されているかを評価する。また、補正後のインパルス応答に生じる時間波形の変化にも着目し、補正法が測定結果に与える影響を明らかにすることを試みる。

4. 研究方法

本研究では、まず既往研究で示されている補正手法を再現することから開始する。第一段階として、無響室においてインパルス応答の測定を行い、測定系の特性を含んだ基礎データを取得する。

無響室での測定には、小型スピーカ、大型スピーカ、12面体スピーカの3種類のスピーカを用いた。スピーカの種類を変えることで、音源特性の違いが補正結果にどのような影響を及ぼすかを確認することを目的としている。測定は、PC、オーディオインターフェイス、マイクロフォンから構成される同一の測定系を用いて行う。

なお、この無響室測定は、補正法の効果を直接評価するためのものではなく、補正処理を行う際の前提条件を確認することを目的として実施している。得られた無響室での測定結果をもとに、通常の室内で測定したインパルス応答に対して補正処理を適用することで、測定系の影響を除去する。

補正処理を適用した後のインパルス応答について、周波数領域および時間領域の両面から分析を行う。周波数領域においては、インパルス応答にフーリエ変換を施すことで周波数特性を算出し、振幅特性および位相特性を求める。これらの結果をグラフとして示し、補正前後の特性を比較することで、測定系に起因する影響がどの程度低減されているかを検討する。特に、周波数ごとのばらつきや不規則な変動、位相特性の乱れに着目し、補正処理による改善の有無を確認する。

一方、時間領域においては、補正後のインパルス応答を用いて音声信号との畳み込み処理を行い、再生音を生成する。得られた音声について試聴を行い、補正処理が再生音に与える影響を定性的に評価する。これにより、周波数特性および時間特性の変化が聴覚的にどのように知覚されるかを確認する。

以上の分析を通じて、補正手法の適用による測定結果の変化を、物理的特性の変化と聴覚的印象の両面から検討する。

4.1 使用した機材・ソフト

実験に使用したソフトウェアを以下に示す。

- ・分析ソフト：MathWorks MATLAB

MATLAB は、関数やアルゴリズムの開発、行列計算、GUI 開発などを行うことができるインタープリタ型のプログラミング言語である。収録した音源を数値データとして処理し、高速にグラフを作成できることから、音響信号の解析に適している。本研究では、MATLAB を用いて測定データの数値計算処理を行い、物理的評価を実施した。

(引用：<https://jp.mathworks.com/products/matlab.html>)

次に、実験に使用した機材を以下に示す。

- ・小型スピーカ：GENELEC アクティブ・2 ウェイ・モニター 8010A (図 4.1-1)



図 4.1-1 小型スピーカ

(引用：<https://www.genelec.jp/active-2-way-studio-monitors/8010a/>)

- ・大型スピーカ：GEBELEC アクティブ・2 ウェイ・モニター 8050B (図 4.1-2)



図 4.1-2 大型スピーカ

(引用：<https://www.genelec.jp/active-2-way-studio-monitors/8050b/>)

- ・12面体スピーカ：HBK OmniPower Sound Source Type 4292-L (図 4.1-3)



図 4.1-3 12面体スピーカ

(引用：https://www.hbkworld.com/en/products/transducers/acoustic/sound-sources/loudspeaker/4292-l#!ref_bksv.com)

- ・オーディオインターフェイス：RME Babyface Pro FS
24-Channel 192 kHz bus-powered professional USB 2.0 Audio Interface (図 4.1-4)



図 4.1-4 オーディオインターフェイス
(引用：<https://rme-audio.de/babyface-pro-fs.html>)

- ・マイクロフォン：RION 精密騒音計 NL-53 (図 4.1-5)



図 4.1-5 マイクロフォン
(引用：<https://svmeas.rion.co.jp/products/NL-53.html>)

4.2 無響室における測定方法

本測定は無響室内で実施した。音源にはスピーカを用い、受音点にはマイクロフォンを設置した。スピーカとマイクロフォンは同一の高さに配置し、両者の間隔を 1m に設定した。この配置条件のもとで音響測定を行った。

実際の実験風景を図 4.2-1~3 に示す。

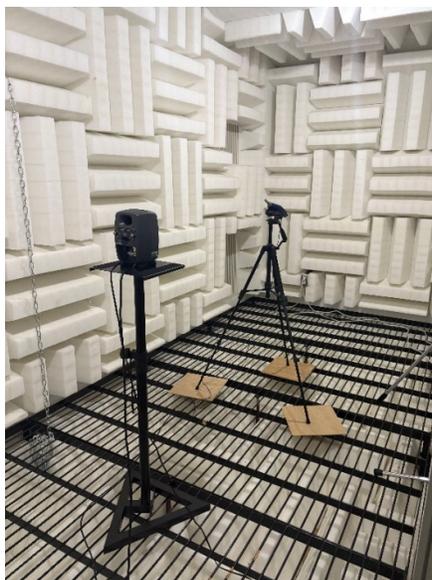


図 4.2-1 小型スピーカでの無響室測定風景



図 4.2-2 大型スピーカでの無響室測定風景



図 4.2-3 12 面体スピーカでの無響室測定風景

4.3 通常の室での測定方法

通常の室における測定は、大学内の研究室にて実施した。音源にはスピーカを用い、受音点にはマイクロフォンを設置した。

実際の実験風景を図 4.3-1~4 に示す。



図 4.3-1 小型スピーカでの通常の室測定風景



図 4.3-2 大型スピーカでの通常の室測定風景



図 4.3-3 12 面体スピーカでの通常の室風景



図 4.3-4 マイクロフォンの設置位置

5. 研究結果

5.1 周波数領域における測定結果による考察

5.1.1 移動平均化とハニング窓について

研究結果の考察にあたり、分析のために周波数領域での移動平均化および時間領域でのハニング窓を適用した。

まず移動平均化とは、周波数軸上で隣り合う複数のデータをまとめて平均し、細かなばらつきを平滑化する方法である。無響室におけるインパルス応答の測定では、スピーカの出力特性により、ある周波数でパワーレベルが急激に減少する場合がある。この急激な減少は式(5)を用いた補正の際に、室の周波数応答の発散を招く恐れがある。この周波数軸上での移動平均化の処理によって、急激なディップが抑えられ、補正を行った際の時間波形の不適切なノイズを削減することが可能となる。

次に、移動平均化を行って得られた室の周波数応答を逆フーリエ変換して算出される時間応答に対して、ハニング窓を適用する。インパルス応答はインパルス入力に対する応答であるが、実際の測定データは有限時間で切り取られた信号である。そのため、インパルス応答の始端および終端において波形が不連続に切断された形となることがある。このような不連続なインパルス波形に対して直接フーリエ変換を行うと、実際には存在しない周波数成分が発生し、周波数スペクトルが広がる現象が生じる。これをスペクトルリークという。スペクトルリークはピーク周波数や帯域特性の評価を不安定にする要因となる。ハニング窓は、インパルス応答の時間波形に対して重み付けを行い、波形の両端が滑らかにゼロへと減衰するよう整形する。これにより、インパルス波形の急峻な切断による不連続性が緩和され、フーリエ変換時に生じる不要な周波数成分が抑制される。結果として、このインパルス応答を畳み込みした際の時間領域での不自然なエコーを回避することが可能となる。

本研究では、測定法および補正法の違いが周波数特性に与える影響を比較することを目的としている。そのため、解析手法に起因する誤差を可能な限り排除する必要がある。移動平均化によって周波数領域のノイズを低減したうえで、さらにハニング窓を適用することでより安定した時間特性の評価を実現している。

5.1.2 小型スピーカによる周波数領域の結果

図 5.1.2-2~5 に、小型スピーカを用いて測定した周波数領域の結果を示す。

本グラフにおいて、青線は予測結果を示している。この予測結果は、backtrace 法および FDTD 法を用いた数値解析により算出したものであり、実測と同一の音場条件（図 5.1.2-1）を仮定し、音響伝搬を支配する物理法則に基づいて音の伝搬挙動を理論的に推定した結果である[2]。本研究では、実測結果と予測結果を同一の評価指標により比較することで、周波数特性の傾向や差異を明らかにし、解析手法の妥当性および再現性について評価を行う。

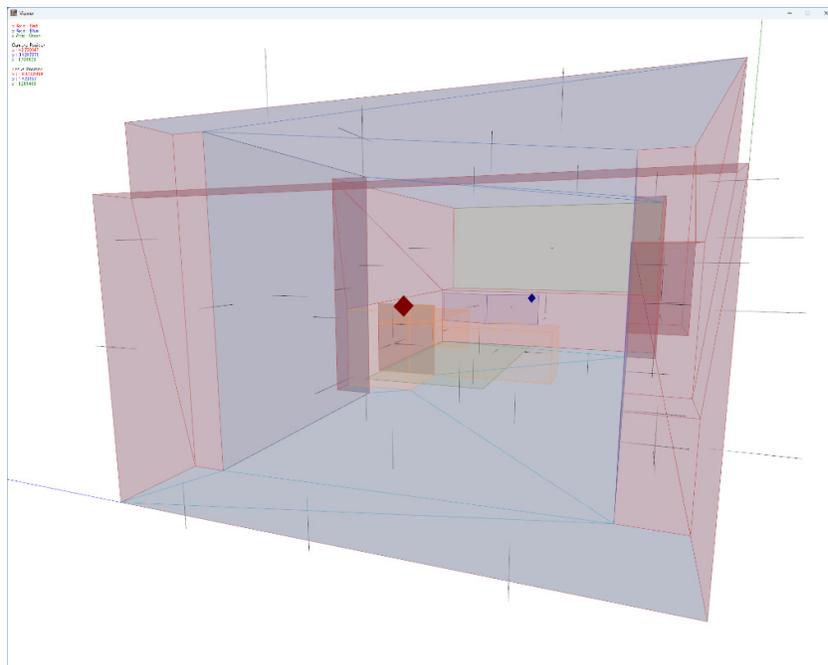


図 5.1.2-1 予測モデル

図 5.1.2-2 は、測定により得られたインパルス応答の未補正結果を示す。

図 5.1.2-3 は無響室測定結果を基準とした除算処理により得られた周波数特性であり、室内測定に固有の低周波数帯域（0~62.5 Hz）での音圧レベルの変化が現れており、周波数ごとに音圧レベルの変動幅が大きい。これは、低周波数帯域において環境ノイズや測定誤差の影響を受けやすいことが一因である可能性がある。

図 5.1.2-4 は無響室録音インパルス応答に移動平均化を施した結果である。低周波数帯域における急峻な変動が抑えられ、全体的な傾向が把握しやすくなっている。これにより、低周波数帯域における音圧レベルの変化が、より連続的な特性として表れていると考えられる。

図 5.1.2-5 は図 5.1.2-3 にハニング窓を適用した結果が示されている。周波数特性上は図 5.1.2-3 と大きく変わらないことがわかる。

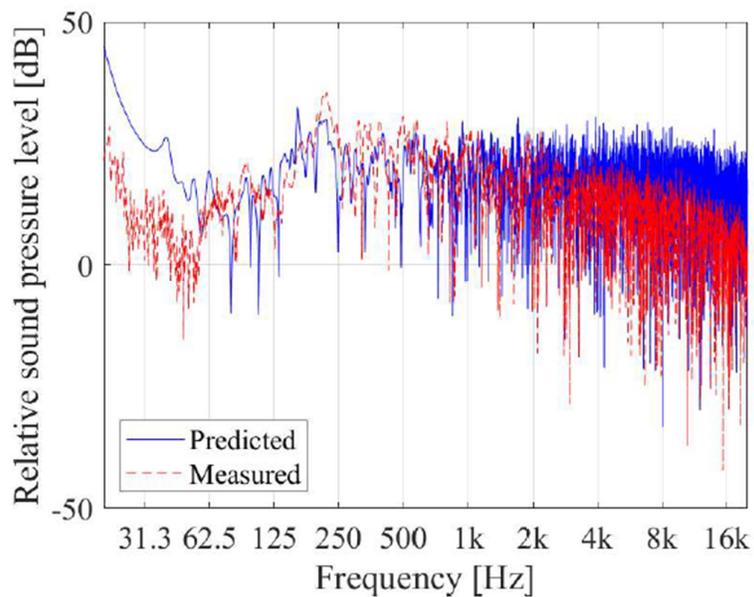


図 5.1.2-2 補正なし

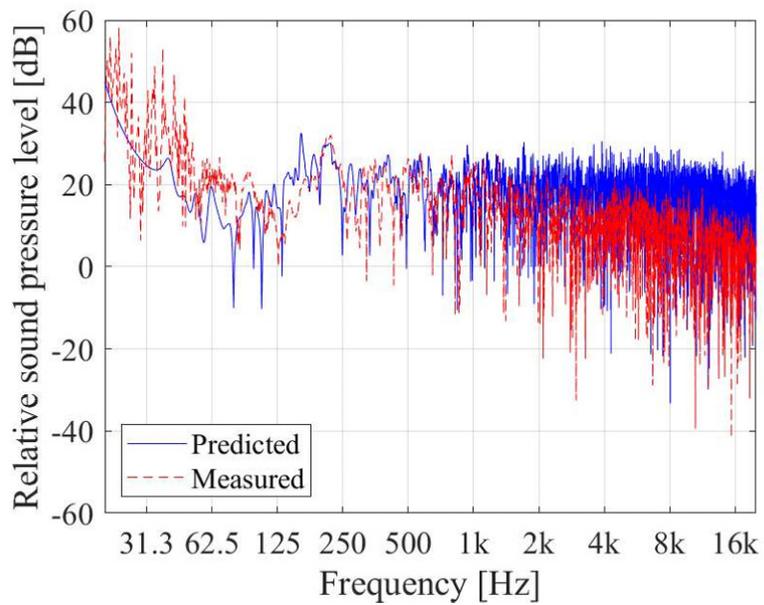


図 5.1.2-3 補正あり

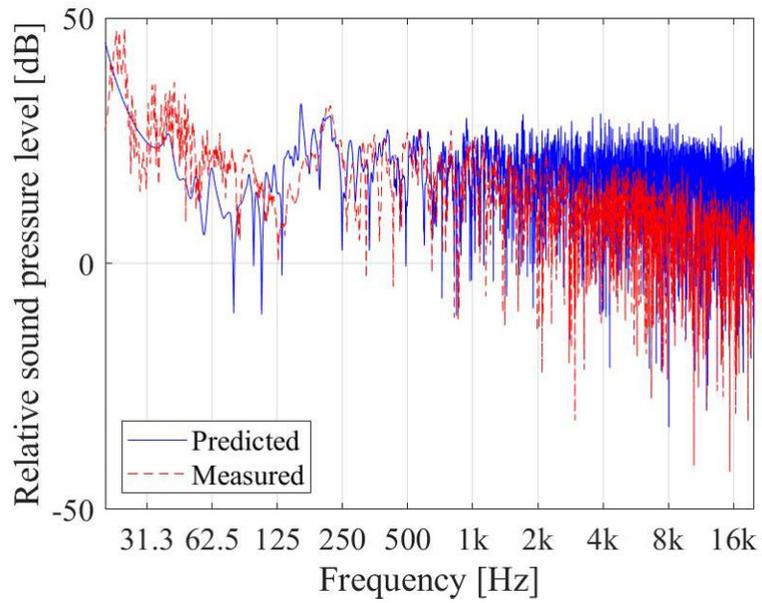


図 5.1.2-4 補正あり（移動平均化処理後）

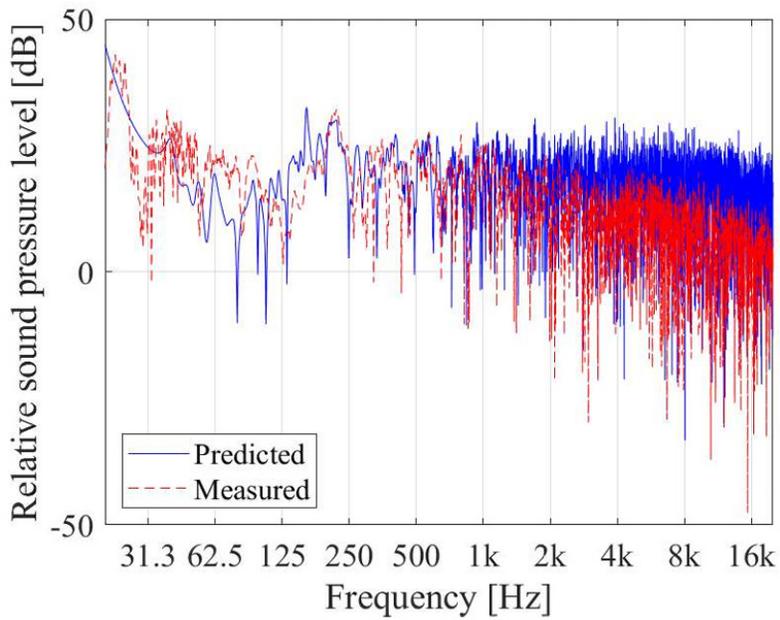


図 5.1.2-5 補正あり（移動平均化+ハニング窓処理後）

5.1.3 大型スピーカによる周波数領域の結果

図 5.1.3-1~4 に、大型スピーカを用いて測定した周波数領域の結果を示す。

図 5.1.3-1 は、測定により得られたインパルス応答の未補正結果を示す。

図 5.1.3-2 は無響室測定結果を基準とした除算処理により得られた周波数特性を示す。31.3~50 Hz 帯域において音圧レベルが周波数ごとに大きく変動しており、隣接周波数間で不規則なピークやディップが多く見られる。この帯域では波長が長く、測定環境やノイズの影響を受けやすいため、除算処理後であっても周波数特性が不安定になっている可能性がある。

図 5.1.3-3 では、図 5.1.3-2 に移動平均化を行った結果である。図 5.1.3-1 で見られた細かい変動が抑えられ、31.3~50 Hz 帯域における音圧レベルの変化が緩やかになっている。このことから、ランダム性の高い成分が低減され、当該帯域における全体的な傾向が把握しやすくなったと考えられる。

図 5.1.3-3 では、さらにハニング窓を適用した結果が示されている。図 5.1.3-2 との違いはほとんど観察されない。

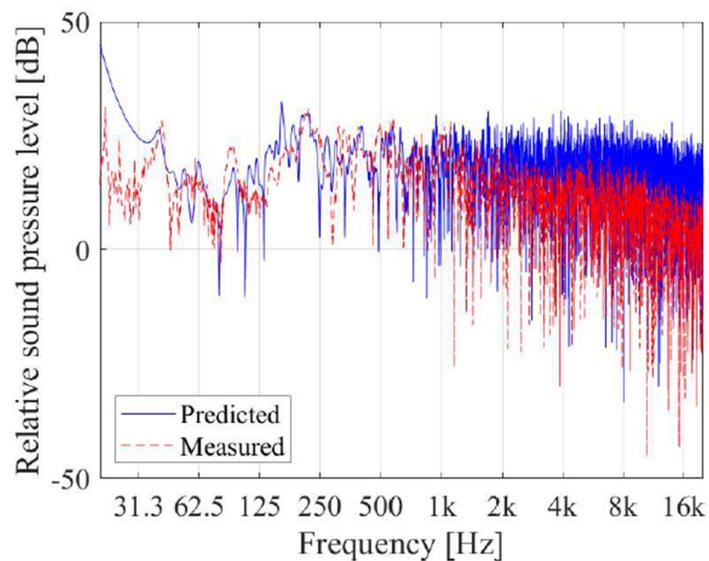


図 5.1.3-1 補正なし

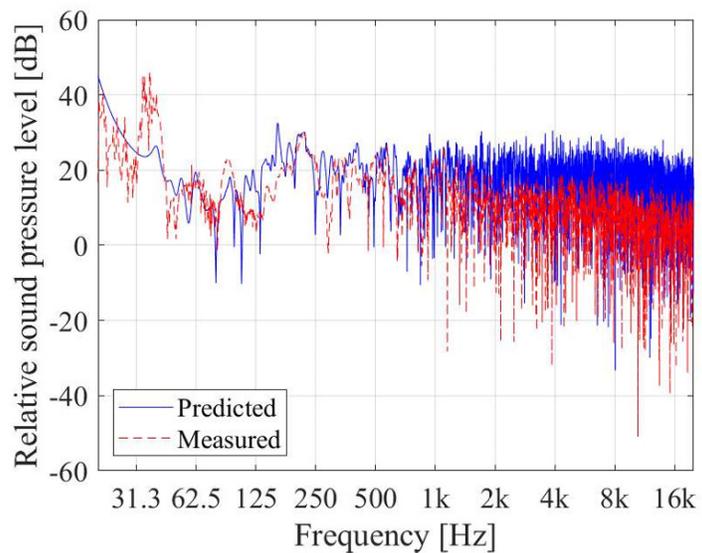


図 5.1.3-2 補正あり

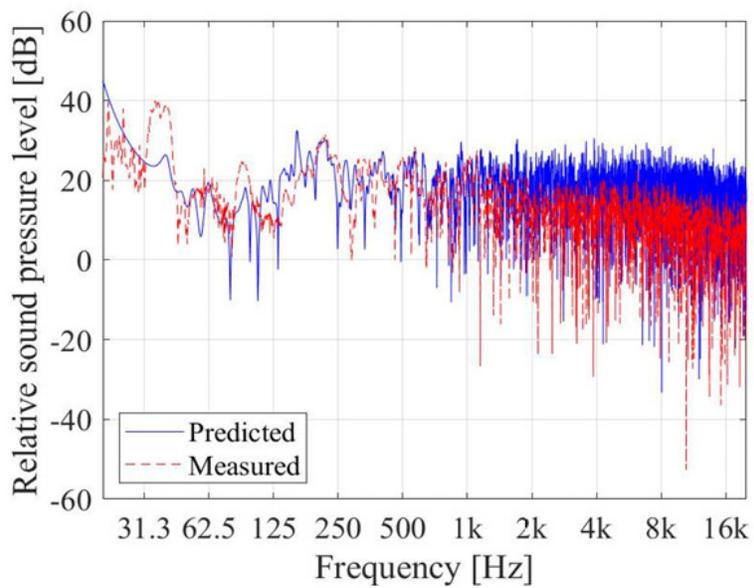


図 5.1.3-3 補正あり (移動平均化処理後)

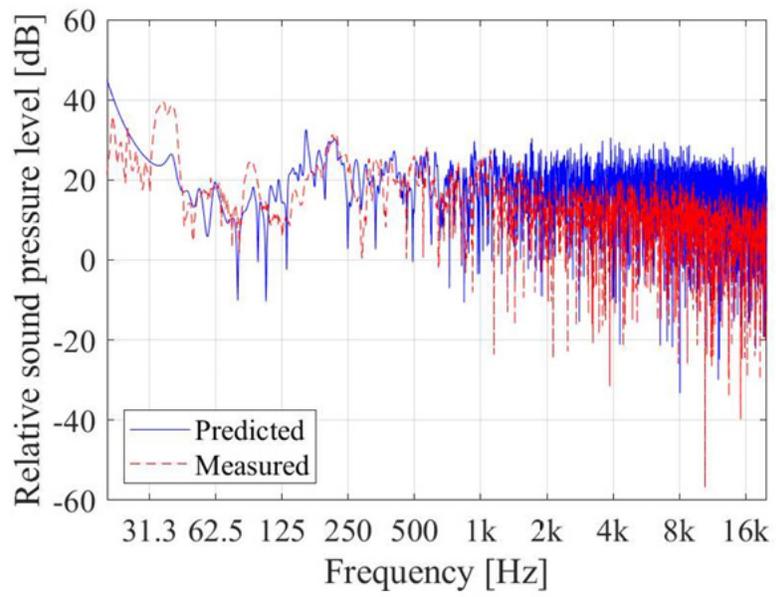


図 5.1.3-4 補正あり（移動平均化+ハニング窓処理後）

5.1.4 12面体スピーカによる周波数領域の結果

図 5.1.4-1~4 に 12 面体スピーカを用いて測定した周波数領域の結果を示す。

図 5.1.4-1 は、測定により得られたインパルス応答の未補正結果を示す。

図 5.1.4-2 は無響室測定結果を基準とした除算処理により得られた周波数特性を示す。周波数帯域全体にわたり細かなピーク・ディップが多く、特に中高域で振幅のばらつきが顕著であることから、測定環境や反射、ランダムノイズの影響が比較的強く残存している状態と考えられる。

図 5.1.4-3 では、図 5.1.4-2 に移動平均化を行った結果である。全体の傾向を維持しながら局所的な急峻な変動が緩和され、曲線の連続性が向上していることから、補正処理によってランダム成分がある程度低減され、物理的特性の大局的傾向が把握しやすくなっているといえる。

図 5.1.4-4 はさらにハニング窓を適用した結果が示されている。図 5.1.4-2 との違いはほとんどないことがわかる。

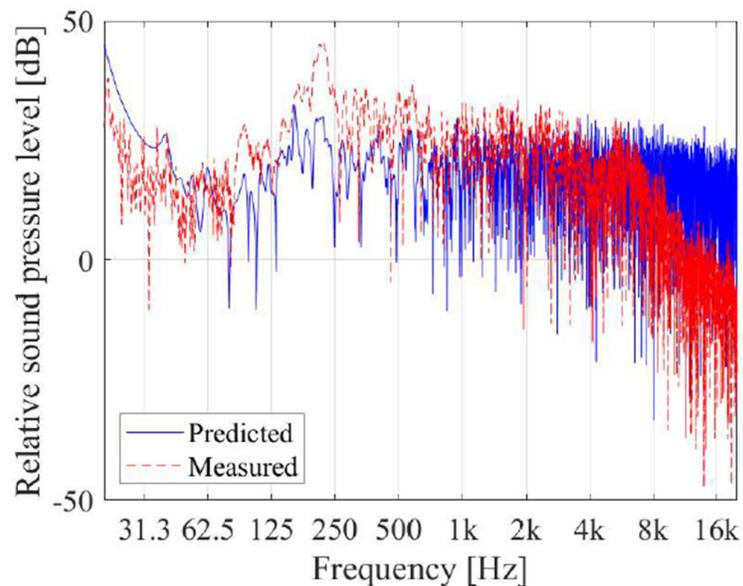


図 5.1.4-1 補正なし

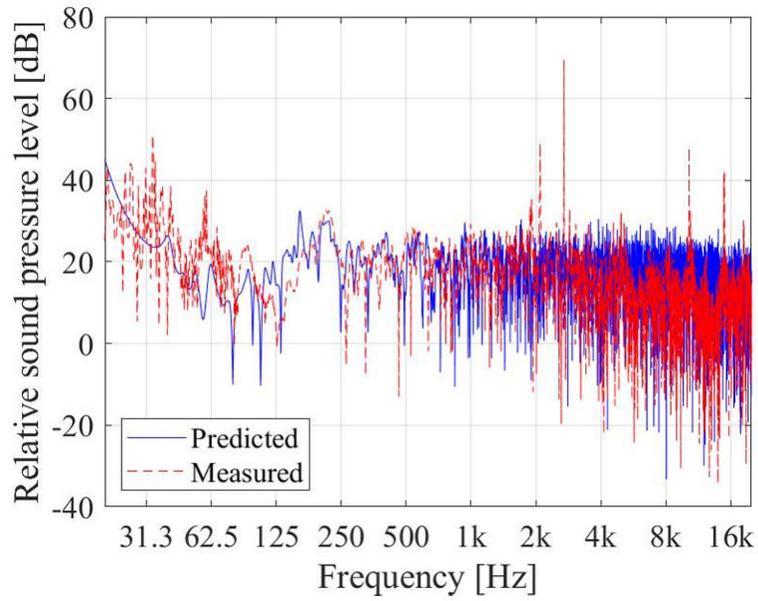


図 5.1.4-2 補正有り

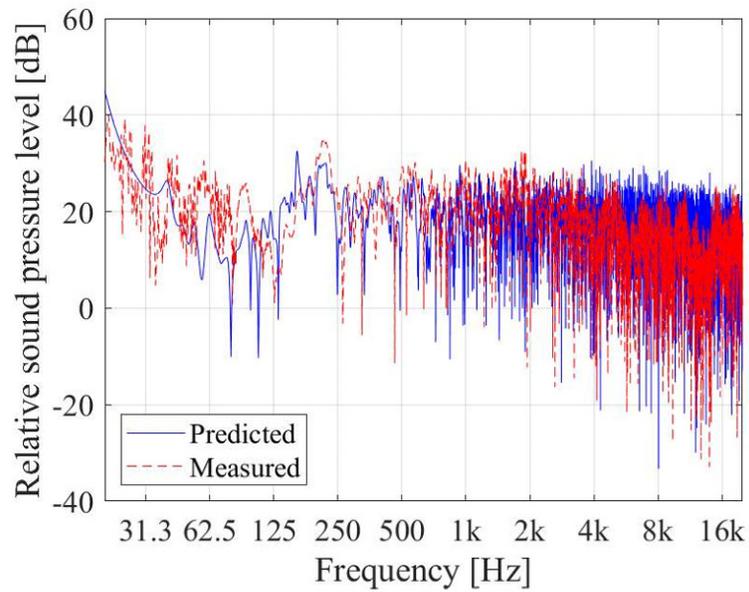


図 5.1.4-3 補正あり (移動平均化処理後)

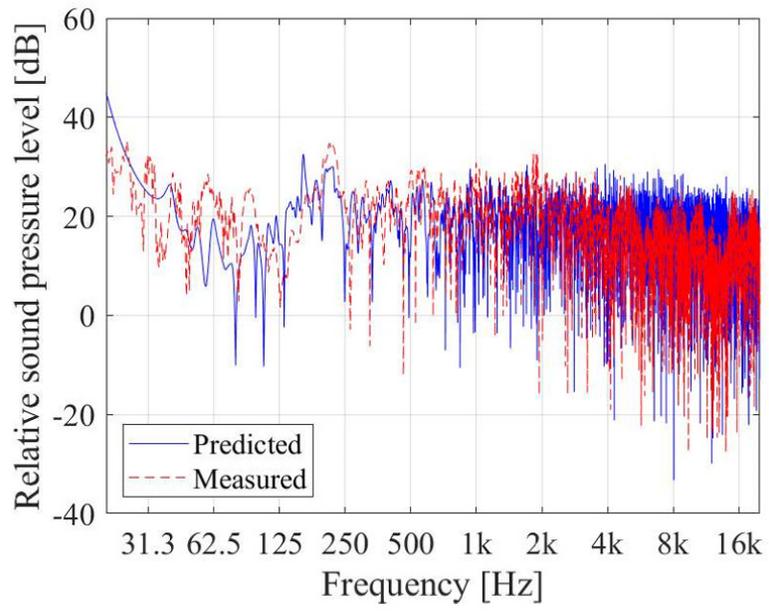


図 5.1.4-4 補正あり（移動平均化+ハニング窓処理後）

5.2 時間領域における測定結果による考察

本研究では、各補正法により得られたインパルス応答を音声信号と畳み込み、その再生音を聴取することで、時間領域特性が聴感に与える影響を評価した。

補正法は以下の3種類である。

1. 無響室測定結果を基準とした除算処理を適用した
2. 1に移動平均化を適用した
3. 2にハニング窓を適用した

以下に、スピーカごとの聴覚評価結果とその考察を示す。

5.2.1 小型スピーカにおける結果

1. 無響室基準の除算処理を適用した音声

除算処理のみを適用した場合、主音の約3秒後に同一音声为重なるような二重音が知覚された。一般に、周波数特性に急峻な変動が含まれる場合、その逆フーリエ変換であるインパルス応答は時間方向に広がることが知られている。本結果においても、補正特性の急峻な成分に起因して、インパルス応答が長時間にわたり減衰する応答となっていた可能性がある。

この長い時間応答が畳み込み再生時に遅延成分として作用し、主音から大きく遅れた二次的な音として知覚されたものと考えられる。

2. 1に移動平均化の適用を適用した音声

移動平均処理を加えた場合、二重音は主音から0.5秒の比較的早い段階で知覚された。これは、移動平均処理により周波数特性の急峻な変動が緩和され、インパルス応答の時間方向に長く減衰する傾向が短縮されたことを示唆している。ただし、時間応答は完全には収束しておらず、短い遅延成分として残存した可能性がある。

その結果、二重音は依然として知覚されたものの、1と比較すると遅延時間は大幅に短縮されたと考えられる。

3. 2にハニング窓の適用をした音声

ハニング窓を適用した場合、明確な二重音やノイズは認められなかった。

インパルス応答端部の不連続性が抑制され、エネルギーが主ピーク周辺に集中したことで、時間方向に長く減衰する傾向が十分に低減されたものと考えられる。

5.2.2 大型スピーカにおける結果

1. 無響室基準の除算処理を適用した音声について

無響室基準の除算処理では、音声は小さく再生され、主音から約 3 秒遅れて二重音が知覚された。これは、補正特性に含まれる急峻な変動によりインパルス応答が長時間にわたり減衰し、その成分が遅延音として再生された可能性がある。

2. 1 に移動平均化の適用を適用した音声

移動平均化を適用すると、二重音は依然として認められたが、主音との時間差は約 0.5 秒程度に短縮された。インパルス応答が時間方向に長く減衰する傾向がある程度抑制されたものの、遅延成分は完全には除去されなかったと考えられる。

3. 2 にハニング窓の適用をした音声

ハニング窓を併用した場合、音声は自然に再生され、明確な二重音やノイズは確認されなかった。インパルス応答が時間方向に長く減衰する傾向が抑制され、安定した再生が得られたと考えられる。

5.2.3 12 面体スピーカにおける結果

1. 無響室基準の除算処理を適用した音声について

無響室基準の除算処理では、「キーン」という高域ノイズが顕著に知覚され、さらに主音から約 3 秒遅れた二重音が確認された。これは、補正特性に含まれる高域の急峻な変動が強調されることで高周波成分が増幅されるとともに、インパルス応答が時間方向に長く減衰する傾向を示し、遅延成分が生じた可能性を示唆している。

2. 1 に移動平均化の適用を適用した音声

移動平均処理を適用すると、高域ノイズは大幅に低減された。一方で、音声は依然として小さく、0.5 秒ほどの短い時間差の二重音が知覚された。これは、高周波の過度な強調は抑制されたものの、時間領域における遅延成分は完全には除去されなかったためと考えられる。

3. 2 にハニング窓の適用をした音声

ハニング窓を適用した場合、ノイズおよび二重音はいずれも認められず、安定した再生音を得られた。時間領域の不要成分が抑制され、全指向性を有する 12 面体スピーカにおいても良好な補正効果が得られたと考えられる。

5.3 まとめ

本実験では、小型スピーカ、大型スピーカ、12面体スピーカを用いて室内測定を行い、無響室測定結果を基準とした除算処理により周波数特性を算出した上で、移動平均化およびハニング窓処理を段階的に適用し、その影響を周波数領域および時間領域の両面から比較検討した。

まず周波数領域においては、いずれのスピーカにおいても除算処理のみの結果では低周波数帯域を中心に音圧レベルの変動が大きく、不規則なピーク・ディップが多く見られた。特に低周波数帯域では、波長が長いことに起因して環境ノイズや測定誤差、室内音場の影響を受けやすく、周波数特性が不安定となる傾向が確認された。

移動平均化を適用することで、局所的な急峻な変動が抑制され、全体的な傾向が把握しやすくなった。さらにハニング窓を適用することで、周波数特性はより滑らかとなり、不要な変動成分が一層低減され、室固有の特性を安定的に表現できる可能性が示唆された。

次に時間領域においては、無響室測定結果を基準とした除算処理のみの場合、周波数特性における急峻な変動が時間波形上で副次的なピークや高域ノイズとして現れ、聴感上の違和感を生じさせることが確認された。すなわち、周波数領域における不連続的な変動が時間領域へ影響し、過渡応答の自然さを損なっていると考えられる。

移動平均化は高域ノイズの低減には一定の効果を示したものの、時間的な二重音の解消には十分ではなく、インパルス応答の収束性の改善には限定的であった。

一方、移動平均化に加えてハニング窓を適用した補正法では、時間波形上の不要な振動成分がさらに抑制され、いずれのスピーカにおいても自然で安定した再生音が得られた。

以上より、本研究で検討した三種類の補正法のうち、無響室測定結果を基準とした除算処理にさらに移動平均処理およびハニング窓を併用した手法が、周波数領域における特性の安定化だけでなく、時間領域特性および聴覚的観点の双方において最も有効であることが示された。したがって、本補正法は室内音響特性評価において有効性の高い処理手法であると結論づけられる。

参考文献

- [1] R. N. Bracewell, *The Fourier Transform and Its Applications*, 3rd ed., McGraw-Hill, 2000.
- [2] M. Toyoda et al., “Filter and correction for a hybrid sound field analysis of geometrical and wave-based acoustics,” *Acoust. Sci. & Tech.* 42(4), 170-180, 2021.

謝辞

本研究の移動平均化処理にあたり、京都大学工学研究科建築学専攻環境構成学講座の大谷真教授に多大なご尽力をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。