

有孔板を用いた

エッジ効果抑制型遮音壁の実験的検証

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 17-0017 岡島 周生

指導教官 豊田 政弘

第1章 序論	2
1-1 研究背景	2
1-2 既往研究	2
1-2-1 エッジ効果抑制型遮音壁	2
1-2-2 エッジ効果抑制型遮音壁の課題	3
1-3 既往研究を踏まえて	3
1-4 既往研究続報	4
1-5 研究目的	4
第2章 物性値の設定	5
2-1 物性値の設定範囲	5
2-2 有孔板条件と挿入損失の関係性	5
2-3 シミュレーション計算、実験的検証の環境	6
2-4 有孔板物性値の決定	6
2-5 シミュレーション結果	9
第3章 実験的検証	10
3-1 遮音壁と有孔板の作成	10
3-2 実験的検証の結果	13
第4章 総括	17

第1章 序論

1-1 研究背景

自動車の幹線道路や鉄道の線路沿い、建設工事等で発生する様々な騒音を低減するために利用される遮音壁には、環境基準達成のための遮音率が求められるが、そのためには非常に背の高い遮音壁を設置する必要があり、日照阻害や景観確保、風圧に耐える構造にするための設置コストや労力等の様々な問題が懸念される。これらの問題点を解消するためには、遮音壁自体の高さを抑えることが望ましいと考えられ、これまでに様々な遮音壁が開発されてきた。一例として、音圧に着目してパッシブやアクティブな吸音機構により遮音する先端改良型遮音壁が開発されたが、先端の吸音機構を設けてもあまり大きな効果を得ることが出来ず、遮音性能を向上させるためには、問題点があったとしても遮音壁を高くする必要があった。

1-2 既往研究

1-2-1 エッジ効果抑制型遮音壁

上記の問題に対して、音圧ではなく粒子速度に着目することで高い遮音効果が得られた遮音壁が「エッジ効果抑制型遮音壁」である[1]。この遮音壁は、従来ではほとんど認識されていなかったエッジ効果に着目している。エッジ効果とは、遮音壁のような薄い平板のエッジ部分で、音波の入射面とその裏面で音圧振幅に大きな差が生じ、急激な音圧振幅の変化によって空気の粒子速度が非常に大きくなる現象のことである。このエッジ効果は回折音場に非常に大きな影響を与える為、エッジ効果を如何に抑えるかが遮音性能向上のポイントとなり、回折音を抑える為には、寄与が最も大きいと考えられるエッジ部分での大きな粒子速度を抑える必要がある。エッジ部分での大きな粒子速度を抑える為には、抵抗が大きい密な板などを設置することで振動を抑えることが考えられるが、設置した板の先端でまたエッジ効果が生じてしまう。そこで、適切な流れ抵抗を持つ多孔質吸音材を遮音壁のエッジ部分（先端部分）に設置し、上部に行くに従って孔のグラデーションを設けて抵抗を小さくすることで、新たなエッジ効果を生成することなくエッジ部分両面での音圧差を効果的に抑制する。これを応用することで高い遮音効果を得たのがエッジ効果抑制型遮音壁である。適切な流れ抵抗を持つ吸音材としてよく使われるものは、アルミニウム繊維(画像1)やグラスウール(画像2)であり、例えば、高さ3mの遮音壁において、これらを設置することで約15dBの騒音レベルの低減が可能である。



画像1 アルミニウム繊維



画像2 グラスウール

1-2-2 エッジ効果抑制型遮音壁の課題

上述した通り、エッジ効果抑制型遮音壁には多孔質吸音材を利用しているが、アルミニウム繊維やグラスウールなどを用いる場合、大きく分けて2つの問題点が存在する。まず1つ目は、多孔質吸音材は耐候性が乏しいことである。雨風や湿気に弱いため、必然的に吸音材を覆うカバーが必要となり、そのカバーがエッジ効果の抑制を妨げてしまう。2つ目の問題点として、多孔質吸音材では、先端に向けて抵抗を小さくするために物性値を徐々に減少させることが困難なことである。これは、アルミニウム繊維やグラスウールが非常に細かい繊維で形成されており、物性値のなめらかな減少のために斜めにカットすることが困難なためである。この点に対して、現在は比較的薄い多孔質吸音材を重ねることで段階的に物性値を減少させているが、本来であればより連続的に物性値の差異によるグラデーションを形成したい。このように、従来利用してきた多孔質吸音材には問題点があるため、エッジ効果抑制型遮音壁としての性能向上には限りがあると考えられる。

1-3 既往研究を踏まえて

既往研究によるエッジ効果抑制型遮音壁の問題点を考慮した際に、新たな提案として多孔質吸音材を用いるのではなく、有孔板を利用することがあげられる。有孔板は、様々な素材で作成することができ、十分な耐候性を与えることが可能である。また、薄く、軽くすることができる。また、孔径や開孔率を変化させることで物性値の細かい制御が可能となる。これらのメリットは、1-2-2で記した多孔質吸音材の問題点を克服し得るものであると考えられる。そこで、エッジ効果抑制型遮音壁において、多孔質吸音材を有孔板で代用できるようにすることが、既往研究を踏まえて考えられた本研究での目的である。そのためには、多

孔質吸音材を用いたエッジ効果抑制型遮音壁と同程度かそれ以上の遮音効果を、有孔板を用いた際に発揮させる必要がある。

1-4 既往研究続報

エッジ効果抑制型遮音壁として、有孔板を用いた既往研究が存在する[2]。そこでは、「多孔質吸音材と同等の透過率を有する有孔板を用いれば、同じ性能のエッジ効果抑制型遮音壁となるのではないか?」といった仮説のもとに研究が行われたと記されている。しかし、結果としては、有孔板では多孔質吸音材と同等の透過率を実現させることは不可能であり、また可能な限り同等の透過率を有する有孔板を用いたとしても、多孔質吸音材ほどの遮音効果を得ることは出来なかったと記されている。

また、上記の既往研究の結果を踏まえた上で解析的検討(シミュレーション)を行った既往研究が存在する[3]。そこでは、「多孔質吸音材と同等の透過率を有する有孔板」といった条件には縛られず、物性値の細かい制御が可能であるといった有孔板のメリットを最大限に活かすため、それぞれ板厚や孔の大きさ、孔間隔といった条件の異なる有孔板の遮音効果を予測しながら、有孔板を用いた場合の最も遮音性能が高いエッジ効果抑制型遮音壁を探索している。有孔板の条件の変更点として、挿入損失に影響を与える①孔の直径(孔径)、②板厚、③開孔率(有孔板にどれだけの孔が存在しているか)、④面密度(有孔板の重さ)の4つがあり、これらの条件を組み合わせることで予測を繰り返している。結果として、適切な組み合わせを与えることで、多孔質吸音材を使用した場合と同程度の遮音効果が得られる可能性があることが示されている。

1-5 研究目的

有孔板を用いたエッジ効果抑制型遮音壁の目標としては、多孔質吸音材を用いた際のエッジ効果抑制型遮音壁と同程度かそれ以上の遮音効果を得ることである。これを実現するためには、シミュレーションで出した計算結果と実験によって出した計測結果がしっかり一致するかどうかを確かめる必要がある。本研究では、既往研究[3]に引き続き、有孔板を用いた際の最も遮音効果の高い条件の探索、その条件下でのシミュレーション計算、また、実際にその有孔板を用いた実験的検証を行うことで結果に相違が生じていないかを確認することが目的である。本研究によって、シミュレーション計算結果の信用性や、実際の有孔板の問題点や改善点を考察することができると考えられる。

第2章 物性値の設定

2-1 物性値の設定範囲

有孔板の物性値を設定するにあたって、板厚や孔径の設定範囲は無限大という訳にはいかない。例えば、板厚を非常に薄くする場合、実現するにあたって非常に高い技術が必要となる場合や、実現不可能となってしまう可能性がある。そこで、有孔板の物性値を実現可能な範囲で数値設定するために、本研究では以下の範囲での数値設定を行うこととする。

数値設定範囲

- ・ 孔径 $d_p=0.0001$ m 以上
- ・ 板厚 $h_p=0.001$ m 以上
- ・ 開孔率 $pr=1\%$ 以上
- ・ 面密度 $sd=h_p \times 1150$ kg/m³(アクリル想定の体積密度)

2-2 有孔板条件と挿入損失の関係性

既往研究[3]では、大きな遮音効果が得られる有孔板の物性値探索にあたって、孔径、板厚、開孔率のうちの一項目のみを変化させることで、各項目の変化が有孔板の挿入損失にどのような影響を与えているかを調べている。こちらでは、予め有孔板条件の基準値を設定しておき、一項目のみを基準値より0.5倍毎や2倍毎と変化させることで、各項目の変化と有孔板の挿入損失を調べている。その結果、孔径の値を0.5倍毎に変化させることで約600～1500 Hzの範囲で挿入損失が大きくなること、板厚の値を0.5倍毎に変化させることで約1600～3000 Hzの範囲で挿入損失が大きくなることを確認した。このように、孔径、板厚は基本的にはより小さく、より薄く設定した方がより良い遮音性能を発揮することが示された。また、有孔板の物性値変化によって特定の周波数の範囲で非常に大きな挿入損失を得るケースが見かけられた。鉄道や高速道路のような様々な周波数の音を発する場面では使用できないが、ファン(送風機)などから発せられるように音の周波数が限定的である場合、遮音すべき音の周波数と特定の周波数で大きな挿入損失が得られるその範囲が一致すれば、十分にその物性値での有孔板には利用価値があると考えられる。

2-3 シミュレーション計算、実験的検証の環境

本研究では、既往研究[1]で採用された以下の図1、図2の条件でシミュレーション計算と実験的検証を行う。壁のポリウールは無響室空間を作り出すために使用されている。また、以下の図では受音点としてA、Bとあるが、本研究ではA点のみを受音点とし、図2の遮音壁上端の有孔板高さは本研究では0.2 mとする。

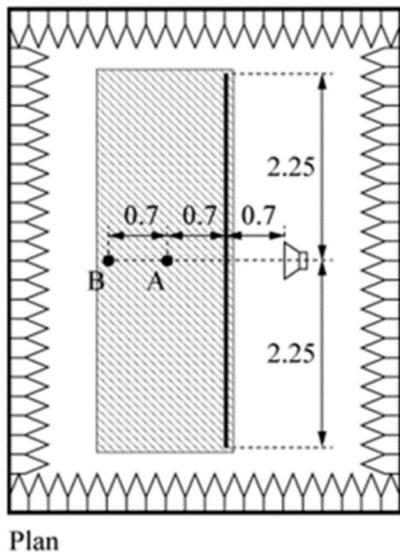


図1 実験条件(上からみた図)

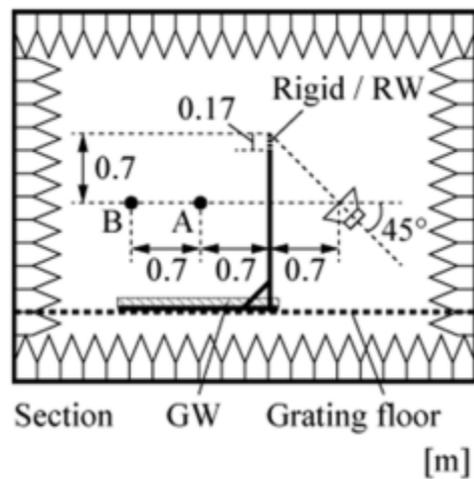


図2 実験条件(横からみた図)

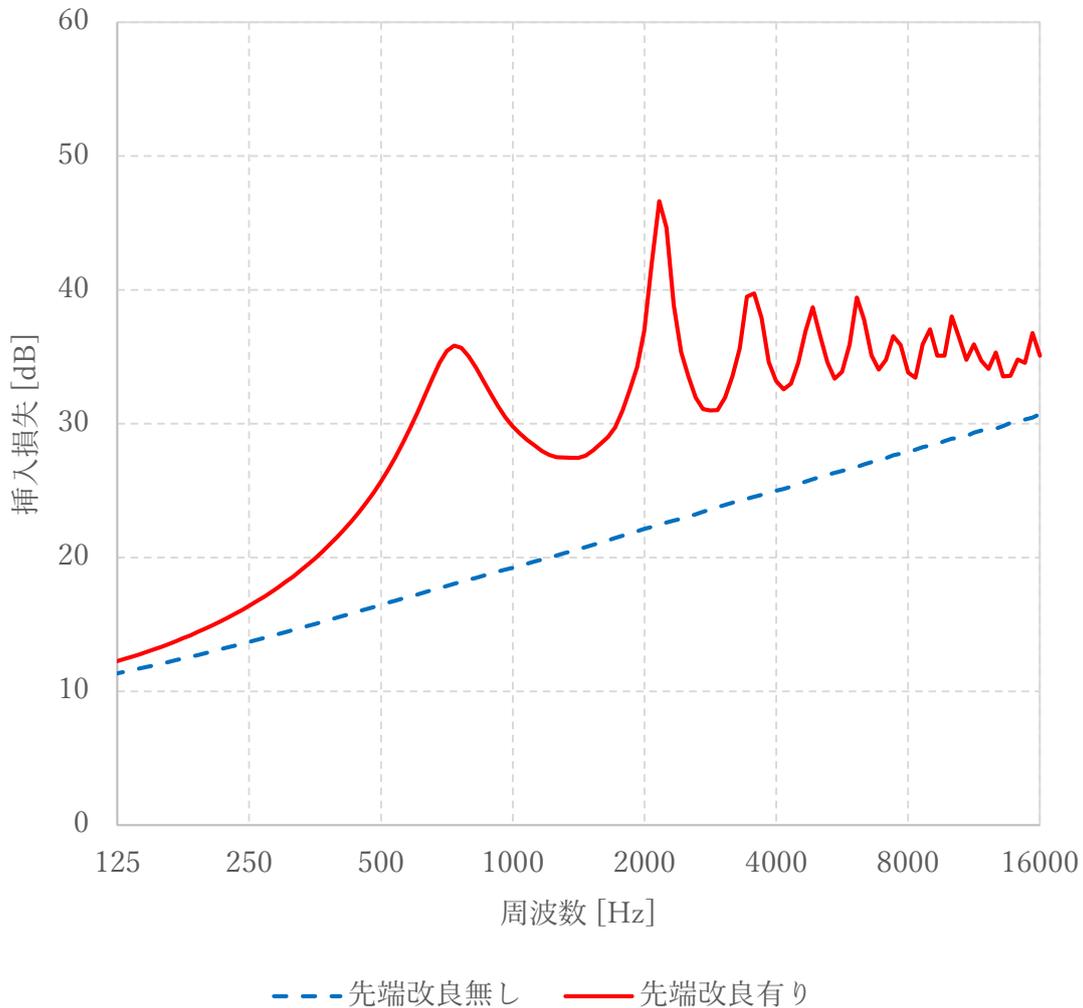
2-4 有孔板物性値の決定

エッジ効果抑制型遮音壁に用いる有孔板の条件を様々な組み合わせで、時間の許す限りシミュレーション計算を行った結果、遮音効果の最も高い有孔板の条件を以下の通りに決定した。

- ・ 孔径 $d_p = 0.0001$ m
- ・ 板厚 $h_p = 0.001$ m
- ・ 下端開孔率 $p_r = 1\%$
- ・ 上端開孔率 $p_{rmax} = 10\%$
- ・ 面密度 $s_d = 1.15 \text{ kg/m}^2$

上記の有孔板条件でのシミュレーション結果がグラフ1である。

予測結果



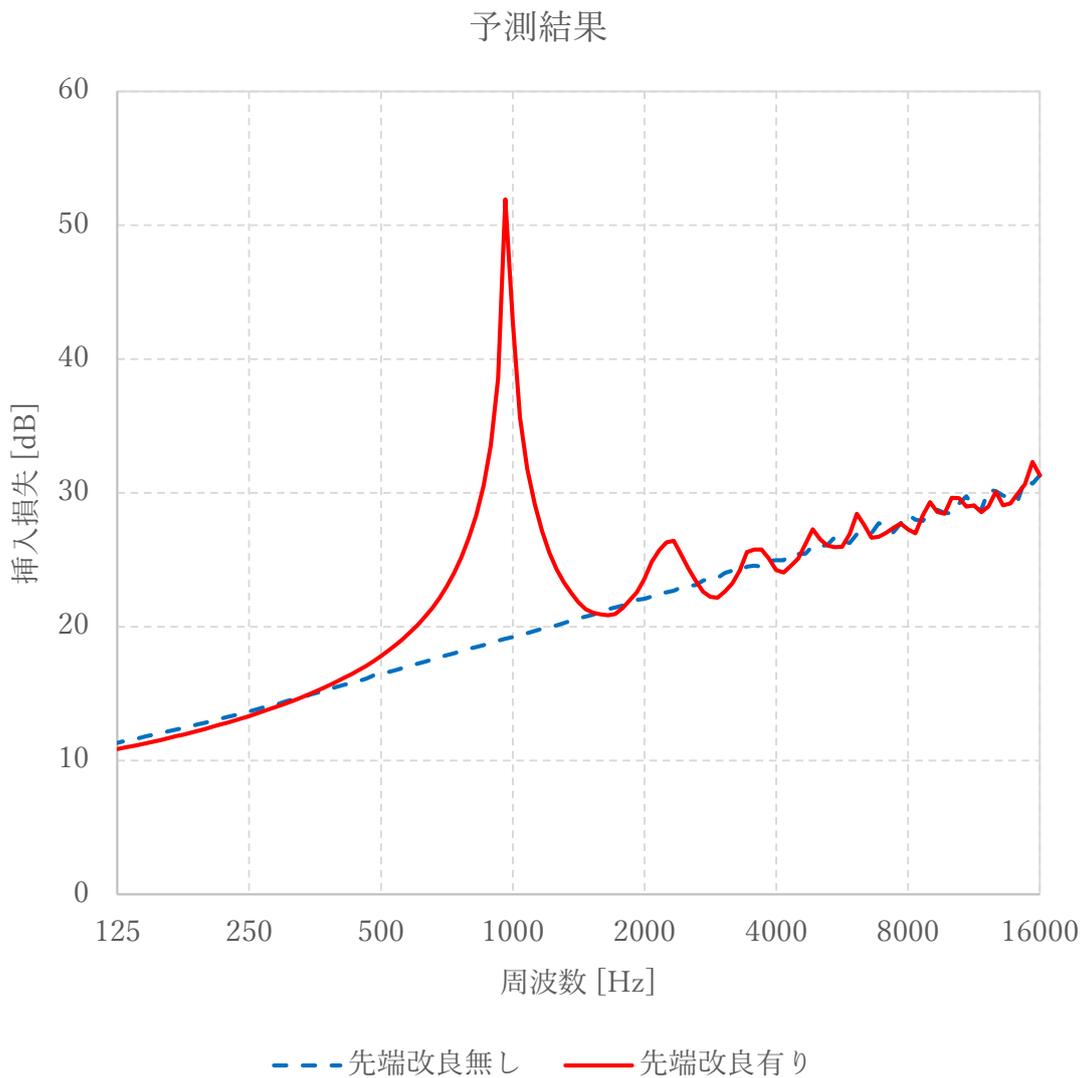
グラフ1 挿入損失のシミュレーション結果
(探索により発見した遮音効果の最も高い有孔板条件)

こちらの条件での有孔板を用いて実験的検証を行う予定であったが、いくつかの有孔板作成業者様に問い合わせたところ、この条件の有孔板の作成は不可能ということであった。本研究での目的が、ある有孔板条件でのシミュレーション計算結果と、実際にその条件での有孔板を用いた実験的検証による結果に相違が生じていないかを確認することであるので、今回はある程度の遮音効果を持ちながら、シミュレーション結果に特徴を持つ条件の有孔板を自力で作成し、それを用いて実験的検証を行うことに決定した。そのような有孔板条件を探索した結果、自力での作成が可能な範囲での有孔板条件を発見したため、本研究ではこちらの条件の有孔板を作成し、実験的検証に用いることとする。

- 孔径 $d_p = 0.001 \text{ m}$
- 板厚 $h_p = 0.001 \text{ m}$
- 開孔率 $pr = 1\%$
- 孔間隔 $= 0.00886 \text{ m}$
- 面密度 $sd = 1.15 \text{ kg/m}^2$

2-5 シミュレーション結果

上記条件の有孔板でシミュレーション計算を行った結果、グラフ2のように1000 Hzで非常に大きな遮音効果が得られるという特徴があった。実験的検証によってこの特徴が再現できれば、少なくともシミュレーション計算の妥当性が証明でき、他の諸定数での有孔板を用いた場合のシミュレーション結果の信頼性も上がることが考えられる。



グラフ2 挿入損失のシミュレーション結果(製作予定)

第3章 実験的検証

3-1 遮音壁と有孔板の作成

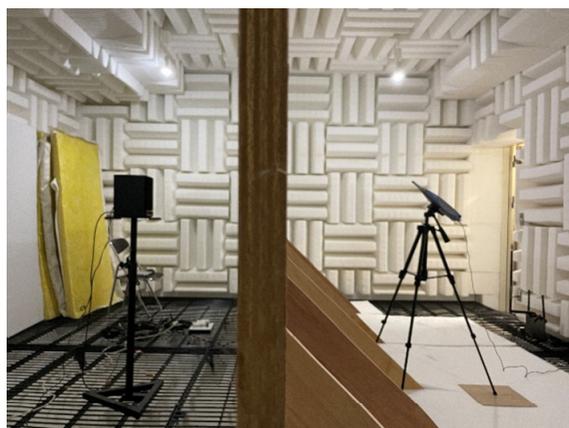
遮音壁の作成では、 $1.8\text{ m} \times 0.9\text{ m}$ の大きさで板厚 0.02 m のベニヤ板5枚、板同士の隙間を埋めるための粘土、遮音壁を固定するためのネジと電動ドリルを用いた。まずは、遮音壁としての板と床板を固定したセットを5つ作成し、なるべく隙間の出来ないように並べた。自力での作成のために生じた5枚の遮音壁の角度のズレは、遮音壁上端を両面より固定することで解消し、遮音壁同士の隙間を粘土で埋めることにより遮音壁の作成を完了した。実験的検証の際には、遮音壁作成に使用した床板からの音の反射を無くすために、床板上に多孔質吸音材を敷くこととした。完成した遮音壁(画像3、4、5)を用いて、有孔板を設置しない場合の遮音性能を測定した。スピーカー、マイクの高さは図2に示す通り、遮音壁上端から 0.7 m の位置である。



画像3 ベニヤ板のみの遮音壁(音源側)



画像4 ベニヤ板のみの遮音壁(受音側)



画像5 ベニヤ板のみの遮音壁(側面)

第2章で記した通り、本研究では有孔板も自力で作成するため、 $0.9\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ の大きさで板厚 0.001 m の亚克力板5枚、孔径が 0.001 m のため直径 0.001 m の穴あけ用電動ボール盤、開孔率の通りに孔位置を示した紙、亚克力板と孔位置を示した紙を張り付けるためのスプレーのりを用意した。5枚の亚克力板と孔位置を示した紙をスプレーのりで接着し、電動ボール盤を使用して亚克力板に直径 0.001 m の穴を全て手動で空けた(画像6)。



画像6 電動ボール盤使用光景

完成した5枚の有孔板は遮音壁上端に設置した微量の粘土によって固定し、有孔板上端のズレは孔を塞がないようにセロハンテープで固定した。これにより、有孔板を用いたエッジ効果抑制型遮音壁(画像7、8)の完成とし、測定を行う。スピーカー、マイクの高さは図2に示す通り、有孔板上端から 0.7 m (ベニヤ板上端から 0.5 m)の位置である。

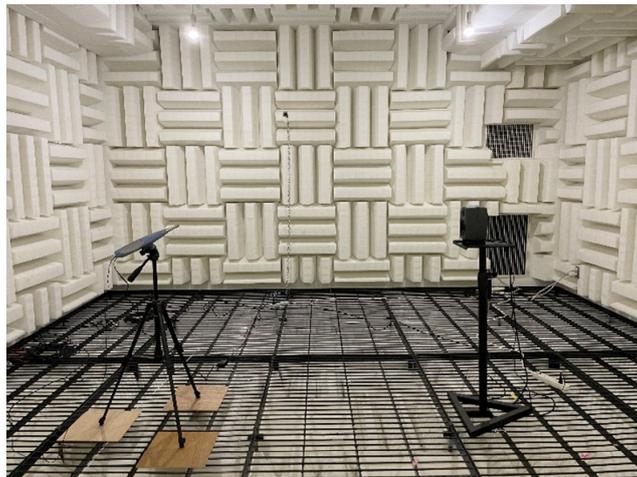


画像7 有孔板とベニヤ板の遮音壁
(音源側)



画像8 有孔板とベニヤ板の遮音壁
(受信側)

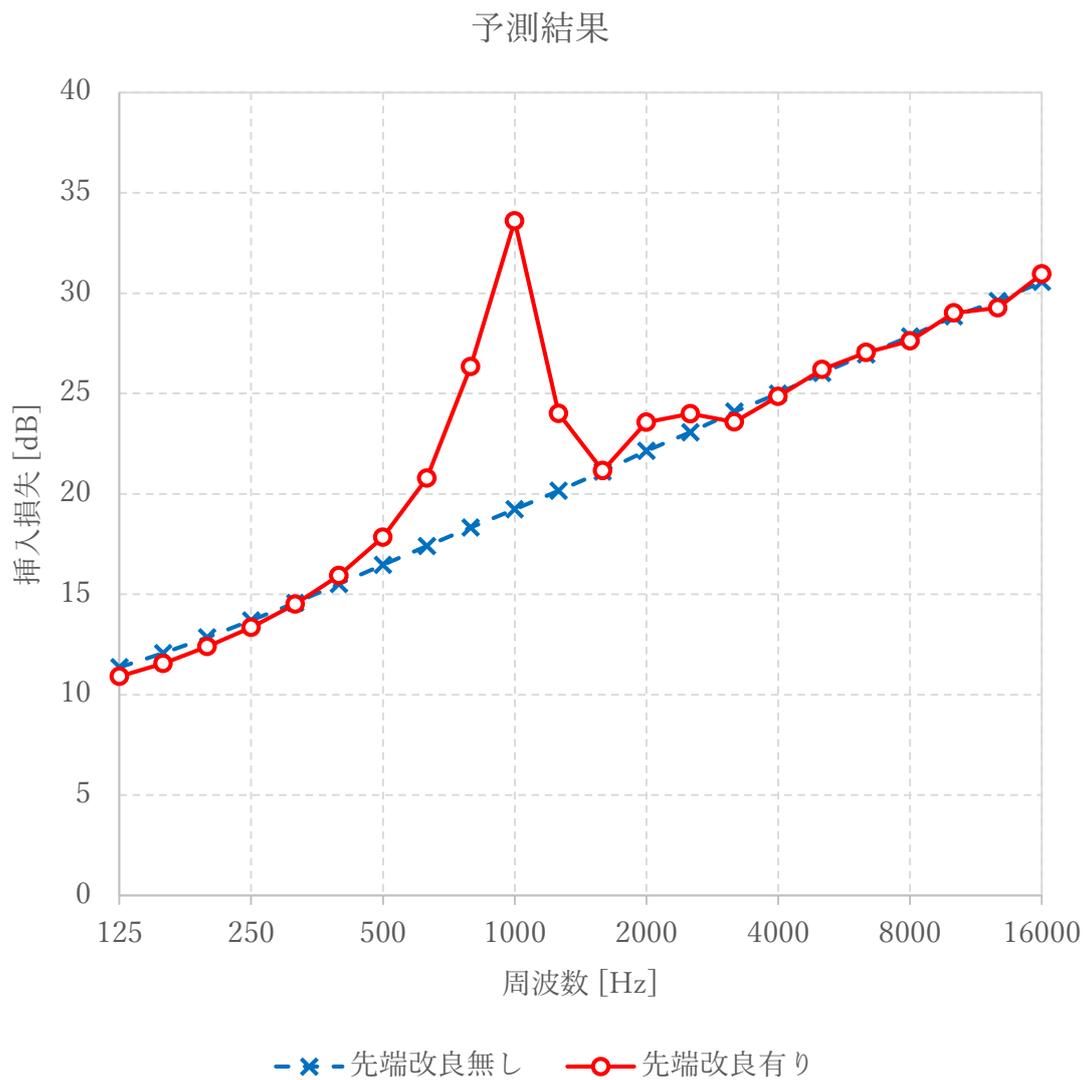
有孔板の有無それぞれの遮音壁を用いて測定を行ったので、最後に挿入損失算出のための遮音壁自体が無い状態での測定を行う。遮音壁を撤去したことで発生した 0.02 m の距離は、スピーカーを寄せることでマイクとの距離である $0.7 \text{ m} \times 2$ を保った(画像9)。



画像9 遮音壁がない状態での測定の様子

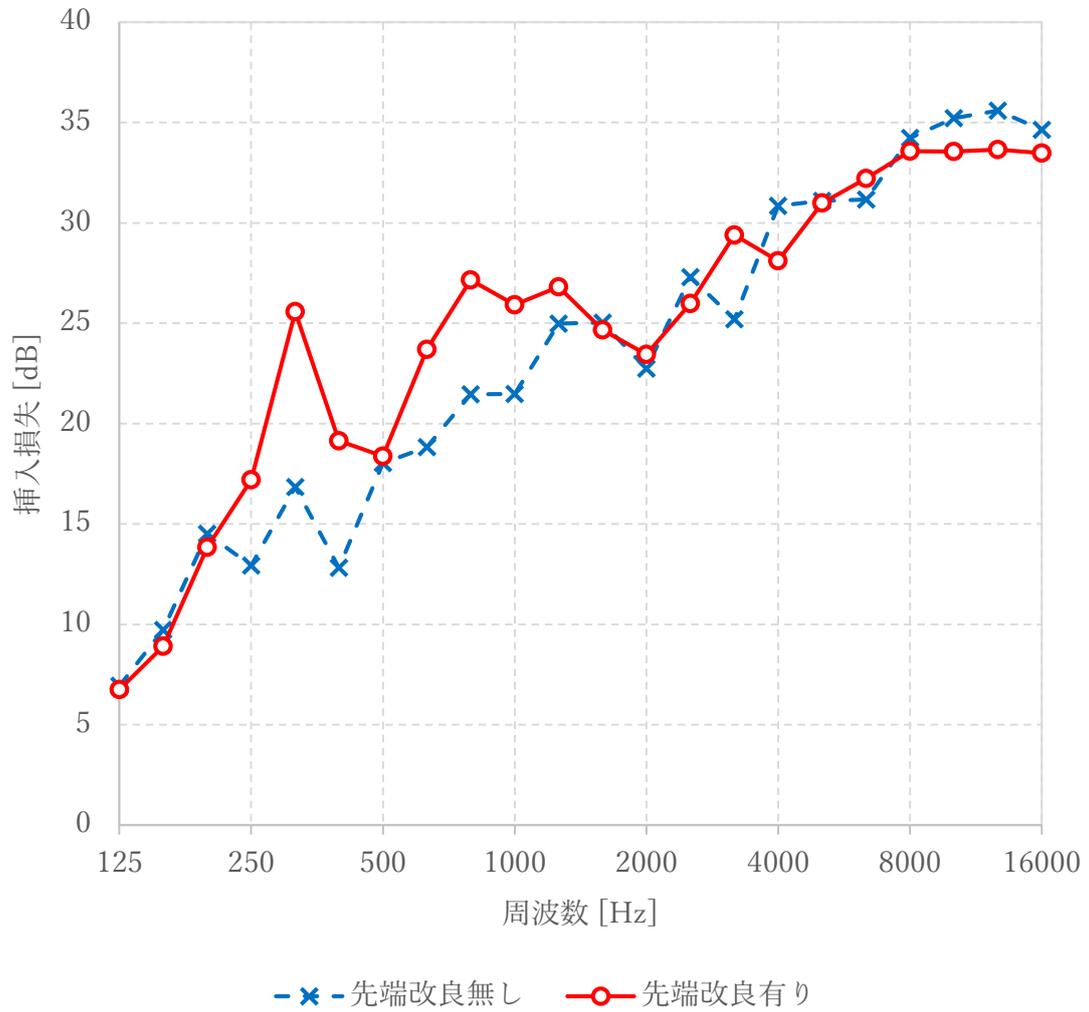
3-2 実験的検証の結果

比較用として実測と同条件でのシミュレーション計算の結果(=グラフ2の1/3オクターブバンド平均値)をグラフ3に示す。実験による結果をグラフ4に示す。また、表1はグラフ3、グラフ4の詳細な数値をまとめたものである(予測・・・グラフ3、実測・・・グラフ4)。



グラフ3 挿入損失のシミュレーション結果(製作した遮音壁)

実測結果



グラフ 4 製作した遮音壁を用いた挿入損失の実測結果

	予測(剛板)	予測(有孔板)	実測(剛板)	実測(有孔板)
125	11.358	10.914	6.9393	6.7431
157.49	12.073	11.558	9.7137	8.9104
198.43	12.855	12.391	14.509	13.839
250	13.692	13.355	12.927	17.198
314.98	14.573	14.515	16.834	25.579
396.85	15.514	15.938	12.826	19.143
500	16.471	17.849	18.025	18.376
629.96	17.398	20.779	18.824	23.695
793.7	18.336	26.346	21.465	27.152
1000	19.239	33.61	21.481	25.913
1259.9	20.159	24.015	24.978	26.81
1587.4	21.117	21.159	25.032	24.673
2000	22.146	23.567	22.747	23.442
2519.8	23.069	23.992	27.298	25.974
3174.8	24.106	23.585	25.192	29.394
4000	24.996	24.856	30.856	28.111
5039.7	26.034	26.193	31.104	30.996
6349.6	26.959	27.038	31.166	32.203
8000	27.848	27.629	34.236	33.576
10079	28.853	29.01	35.209	33.556
12699	29.61	29.267	35.595	33.652
16000	30.566	30.96	34.642	33.481

表1 グラフ3、グラフ4の数値をまとめた表
(左列:周波数[Hz]、他列:挿入損失[dB])

本研究の結果として、シミュレーション計算と実測それぞれの結果であるグラフ 3、グラフ 4 には差異が生じてしまった。原因として考えられるのが、やはり遮音壁から有孔板までの全てを自力で制作したことで発生したズレである。グラフ 3、グラフ 4 を見比べてみると、まず有孔板無しの条件でそもそもズレが生じている。板のみの挿入損失は、問題が無ければグラフ 3 のように直線的な軌道を描くはずであるが、グラフ 4 のように上下にジグザグな軌道を描いている点を見ると、作成時に発生した遮音壁パーツそれぞれの微妙な角度のズレや、音を通してしまいが粘土が入らない程度の遮音壁同士の隙間が存在していたことが原因であると考えられる。

また表 1 より、板のみの予測と実測の数値の差が少ない周波数である 198.43、250、500、629.96、2000、3174.8 Hz を見てみると、有孔板の予測と実測それぞれの数値は大体が他の周波数の欄と比較すると差が少ない結果となっていた。この結果は、遮音壁や有孔板にズレがあった本研究の中でもシミュレーション計算の妥当性を証明できる材料になると考えられる。

第4章 総括

本研究の結果であるグラフ3、グラフ4には差異が生じてしまったが、これによってシミュレーション計算の信頼度が低下することはないものと思われる。その理由としては、制作を全て自力で行うことで予測と実測での遮音壁や有孔板の物性値に違いが生まれてしまったであろうことが挙げられる。有孔板を用いたエッジ効果抑制型遮音壁として、物性値の微々たるズレがある状態で実測を行い、結果としてシミュレーション計算で見た1000 Hzで大きな遮音効果を得られるといった特徴を再現することが困難となってしまった。これらを考慮すると、本研究では、シミュレーション計算の信頼度低下には直結せず、板のみでの予測、実測の数値が似ていた周波数では、有孔板での予測、実測の数値も類似していたように多少なりとも妥当性を証明できるものとなった。

本研究では、制作が自力となってしまったことで遮音壁、有孔板にズレが生じてしまったが、本来は業者様に注文をして制作してもらうべきであった。また、本研究で用いた板厚0.001 mの有孔板はあまりに薄く、実用性の面では良いとは言えなかった。このように、本研究を進めていくと実現可能な物性値の範囲として定めた数値を大幅に見直す必要があることがわかった。遮音効果の大きい有孔板物性値を探索するといったことに縛られず、まずは現実的な範囲での物性値を持った有孔板を用いて実験的検証を行うべきであったことが本研究での反省点である。今後は、この反省点を活かして制作可能範囲での物性値の設定を行い、シミュレーション計算の妥当性を証明できる研究となっていくものと思われる。シミュレーション計算の妥当性を証明した上で、多孔質吸音材以上の遮音効果を発揮する有孔板を実現することがエッジ効果抑制型遮音壁の展望となるだろう。

参考文献

- [1] Y. Kawai, M. Toyoda, “Development of edge-effect suppression barriers”, *Acoustical Science and Technology* 35(1), 28-34, 2014.
- [2] 大谷健太, “有孔板の透過特性の解明”, 関西大学卒業論文, 2020.
- [3] 吉村龍星, “有孔板を用いたエッジ効果抑制型遮音壁の高性能化”, 関西大学卒業論文, 2021.