

# 材質変化による 波動ブラックホールの開発

関西大学 環境都市工学部 建築学科

環境工学第 I 研究室

建 19-25 桂 昌央

指導教員 豊田 政弘 教授

## 目次

1. はじめに .....	2
1.1 研究背景 .....	2
1.2 既往研究 .....	2
1.3 研究目的 .....	5
2. 計算方法 1 .....	7
2.1 波動ブラックホールの再現 .....	7
2.2 壁材への適用 .....	11
3. 結果・考察 1 .....	15
3.1 波動ブラックホールの再現 結果・考察 .....	15
3.2 壁材への適用 結果・考察 .....	17
3.3 目的の修正 .....	19
4. 計算方法 2 .....	20
4.1 波動ブラックホール凹み部分へのシリコンの充填 .....	20
4.2 材質変化による波動ブラックホールの開発 .....	22
5. 結果・考察 2 .....	28
5.1 波動ブラックホール凹み部分へのシリコンの充填 結果・考察 .....	28
5.2 材質変更による波動ブラックホールの開発 結果・考察 .....	31
6. おわりに .....	37
6.1 総括 .....	37
6.2 今後の課題 .....	37
参考文献 .....	38

## 1 はじめに

### 1.1 研究背景

音が壁を通過する際、質量則に則り、壁の単位面積当たりの質量が大きいほど透過損失が大きくなる。その為、壁の設計の際は軽量の物質ではなく高密度で重量のある物質を用いることが一般的である。

しかし、この質量則を超え、軽量でありながら遮音性能を得ることができる物質（メタマテリアル）が存在する。メタマテリアルとは自然界の物質には見られない反応を見せる人工物のことである。今回の研究で着目したメタマテリアルは波動ブラックホールと呼ばれる構造である。一般的に板内部に生じた振動は伝搬し、端部で反射するが、波動ブラックホール内では振動が吸収され反射波が非常に小さくなるという性質を示す。この波動ブラックホールは耐久性・安全性に問題があり現状実用化には至っていないが、実用化に至れば交通機関や建築分野など、様々な分野において設計デザインの拡幅や、コストの抑制といった利点を得ることができる。

### 1.2 既往研究

#### 1) Mironov, Krylov の波動ブラックホール

軽量で低振動・低騒音を得るために Mironov [1]は図 1.2.1 のような波動ブラックホールを提案している。波動ブラックホールは板のエッジにおいて、パネルの板厚  $h(x) = \epsilon x^m$  を急激に減少(伝播距離  $x$  の高次べき級数) させる構造をとる。板厚を端部で減少させていくと、曲げ波の波長が板厚の減少に伴って短くなる。短い距離で波動の波数が多くなり、波が長距離にわたり進行することと等価になる。その板厚の減少(m)が 2 次関数以上のべき級数であると、無反射とできることが理論的に示された。

Krylov [2-4]は図 1.2.2 のように波動ブラックホールの表面に薄い粘弾性減衰材を積層することで効果的に減衰が得られ、ブラックホールの板先端を短くできる

ことを示した。減衰層の効果は(減衰層の板厚/ 鋼板の板厚)の 2 乗に比例することが Oberst [5]の理論から知られている。これよりブラックホールの先端の長さが短くできる。

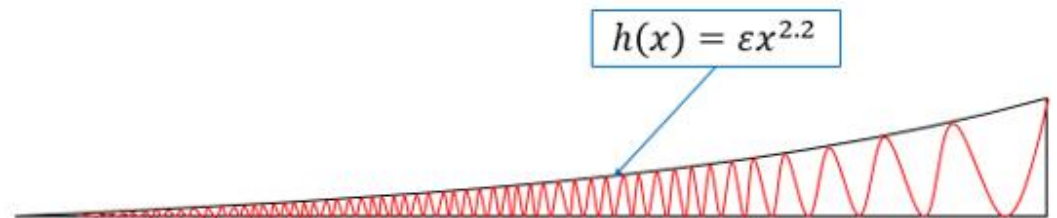


図 1.2.1 Mironov の波動ブラックホール

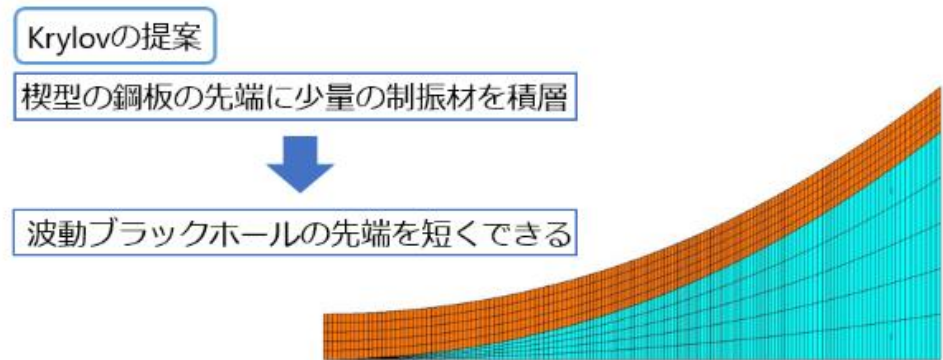


図 1.2.2 Krylov の波動ブラックホール。

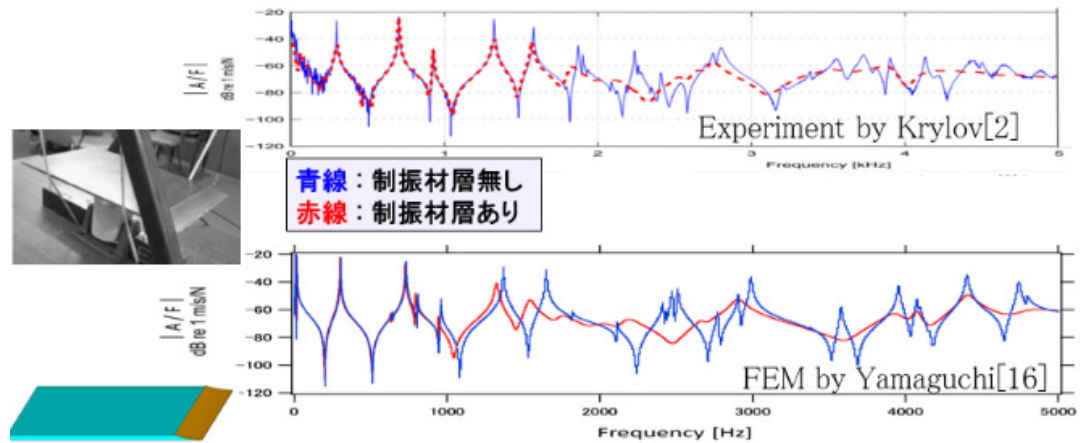


図 1.2.3 波動ブラックホールを持つ平板の振動応答の実験[2]と計算[5]

## 2) クレーター型波動ブラックホール

Krylov の波動ブラックホールの形状は非常に薄く、鋭利であるため、使用できる場所が限定されてしまう。端部の危険性による扱いにくさを改善するため、鋼板の端部ではなく中心部分に向かって円状に板厚を減少させるクレーター型波動ブラックホールが O'Boy ら[6]により提案されている。図 1.2.4 のように、Krylov の波動ブラックホールの断面形状を回転して作製される構造に相当する。

クレーター型においても、波動ブラックホール部の変形が他の部分の変形に比べて相対的に大きいモードで高減衰が得られる。図 1.2.5 はクレーター型波動ブラックホールへの残渣板厚の効果を示したものである。図 1.2.5 のモード損失係数の比較より、残渣板厚を含む波動ブラックホールは、高周波域のみならず、より低周波域で高い減衰効果が得られることがわかる。

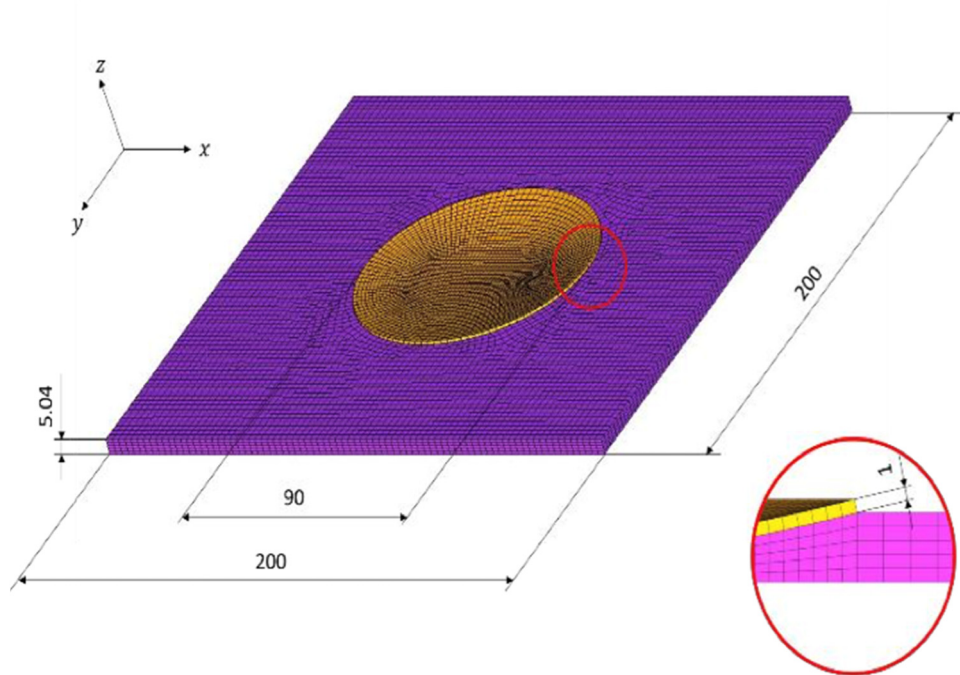


図 1.2.4 クレーター型波動ブラックホール

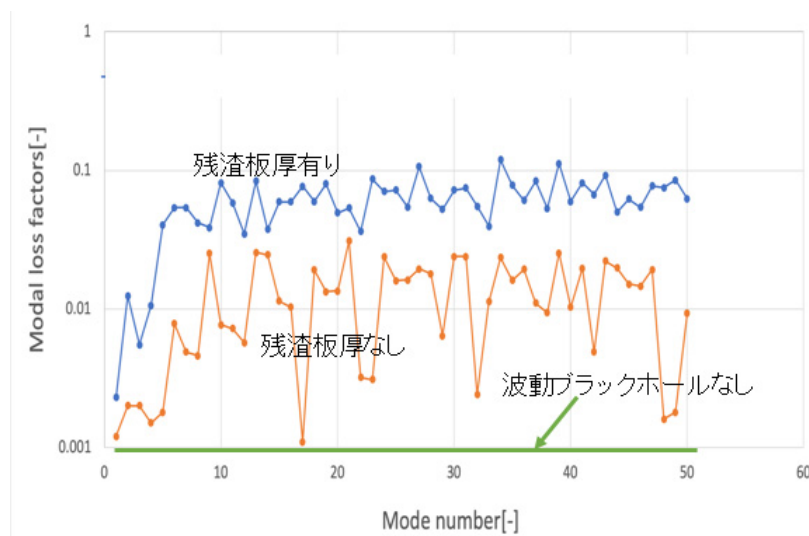


図 1.2.5 クレーター型波動ブラックホールのモード損失係数

### 1.3 研究目的

本研究では「波動ブラックホールの建材への適用」を目的に設定した。

波動ブラックホールを建材に適用することができれば、より安価で、安全な建物を建設することができるようになるだけでなく、設計デザインの幅を広げることが可能となることが期待される。また、制振・遮音特性により近隣住民との騒音トラブルの解消にも繋がると考えられる。

次章では、波動ブラックホールを建材に適用するために行った研究の詳しい内容について述べる。

## 2 計算方法 1

### 2.1 波動ブラックホールの再現

今回の研究目的である「波動ブラックホールを建材に適用する」ことにあたり、COMSOL Multiphysics（以下、COMSOL）というシミュレーションソフトを用いて研究を行う。COMSOL とは科学技術や工学分野で使用されるマルチフィジックスシミュレーションソフトウェアであり、流体力学、電気磁気学、音響学、構造学など様々な分野の物理現象を同時にシミュレートすることが可能である。

はじめに、COMSOL を用いて波動ブラックホール計算モデルを作成し、既往研究と同様の効果が得られるのかどうかを確かめた。今回、板端部を薄くする波動ブラックホールとクレーター型波動ブラックホールの 2 パターンの再現を行った。

板端部を薄くする波動ブラックホール再現の計算方法は以下の通りである。

- 1) COMSOL 上で幅 5000 mm、奥行き 5000 mm、厚さ 100 mm、材質がコンクリートの板を 2 枚作成し（図 2.1.1）、一方に波動ブラックホールとなる部材を接合する（図 2.1.2）。なお、コンクリートの損失係数は 0.05 とする。（波動ブラックホール部分は材質が鉄、幅 5000 mm、奥行き 1000 mm、厚さ 100 mm で、端部に向かって  $y=x^{2.2}$  の曲線を描き薄くなるものである（図 2.1.3））
- 2) それぞれの板の上面中央部（幅 2500 mm、奥行き 2500 mm、高さ 100 mm 位置）に加振点を設定し、下方向に向かって 1 N の力を作用させる。
- 3) それぞれの板の下面中央部（幅 2500 mm、奥行き 2500 mm、高さ 0mm 位置）に受振点を設定し、0~1000 Hz において観測点の各周波数における板部材の変位を求める。



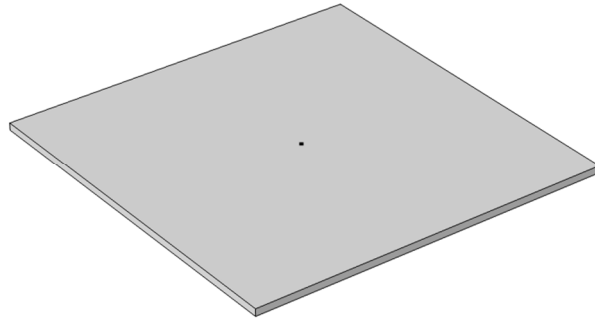


図 2.1.1 波動ブラックホールなしの板材

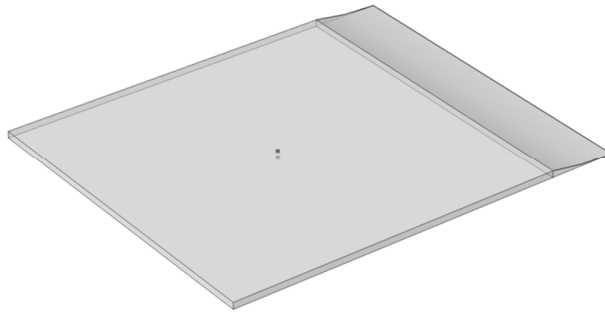


図 2,1,2 波動ブラックホールありの板材



図 2.1.3 波動ブラックホール部分詳細

以上が波動ブラックホール再現の計算方法である。

クレーター型波動ブラックホール再現の計算方法は以下の通りである。

- 1) COMSOL 上で幅 5000 mm、奥行き 5000 mm、厚さ 100 mm、材質がコンクリートの板 (図 2.1.4) を 2 枚作成し、一方にクレーター型波動ブラックホール (図 2.1.5) を反映させる。なお、コンクリートの損失係数は 0.05 とする。(クレーター型波動ブラックホールは板の中央部を中心に半径 1000 mm の大きさで、中心に向かって  $y=x^{2.2}$  の曲線を描き薄くなるものである。)
- 2) それぞれの板の上面 (幅 2500 mm、奥行き 1000 mm、高さ 100 mm 位置) に加振点を設定し、下方向に向かって 1 N の力を作用させる。
- 3) それぞれの板の下面 (幅 2500 mm、奥行き 4000 mm、高さ 0 mm 位置) に受振点を設定し、0~1000 Hz において観測点の各周波数における板部材の変位を求める。

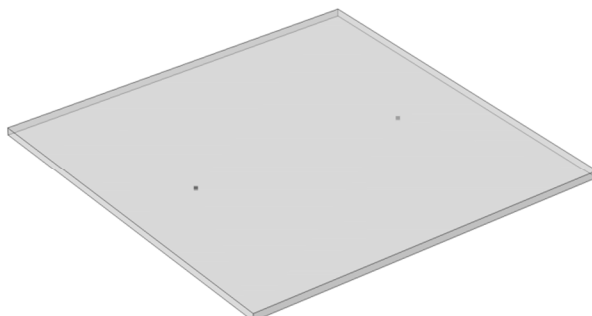


図 2.1.4 クレーター型波動ブラックホール設置前の板材

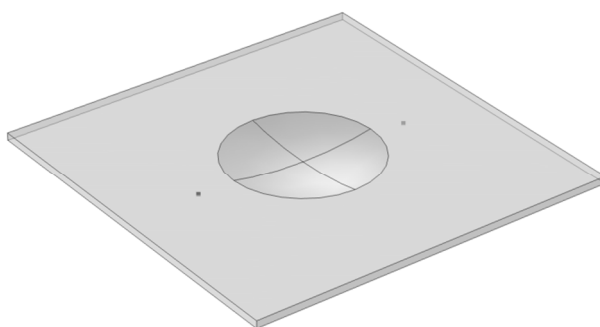


図 2.1.5 クレーター型波動ブラックホール

以上がクレーター型波動ブラックホール再現の計算方法である。

## 2.2 壁材への適用

ここではクレーター型波動ブラックホールを採用し、壁材に音波を当てた場合と壁材を直接叩いた場合の2パターンの遮音性能を検証した。

壁材に音波を当てた場合の計算方法は以下の通りである。

- 1) COMSOL 上で幅 4000 mm、厚さ 200 mm、高さ 3000 mm の材質がコンクリートの壁を作成し (図 2.2.1)、半径 1000 mm のクレーター型波動ブラックホールを設定する (図 2.2.2)。なお、コンクリートの損失係数は 0.05 とする。(クレーター型波動ブラックホールは壁の中央部を中心に半径 1000 mm の大きさで、中心に向かって  $y=x^{2.2}$  の曲線を描き薄くなるものである。)
- 2) 壁面の前後に幅 4000 mm、奥行き 2000 mm、高さ 3000 mm の空間を作成し、3つに分割する。分割の際に生じた面のうち壁前方の面を音波の入力面、壁後方の面を受音面として設定する。
- 3) 入射面から 1 Pa の音圧を発生させ、受音面での 0~250 Hz 間の各周波数における透過損失を求める。

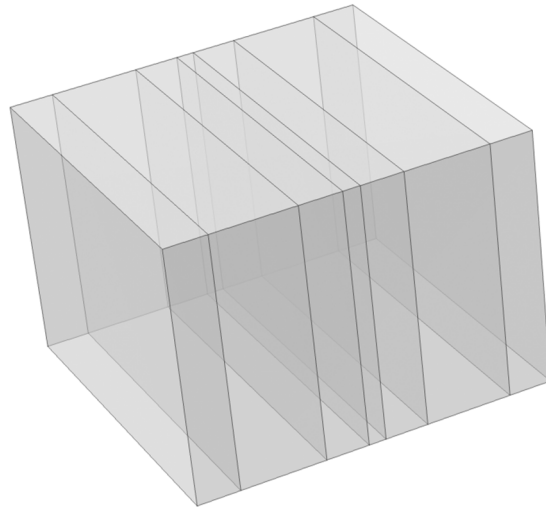


図 2.2.1 波動ブラックホールなしの壁

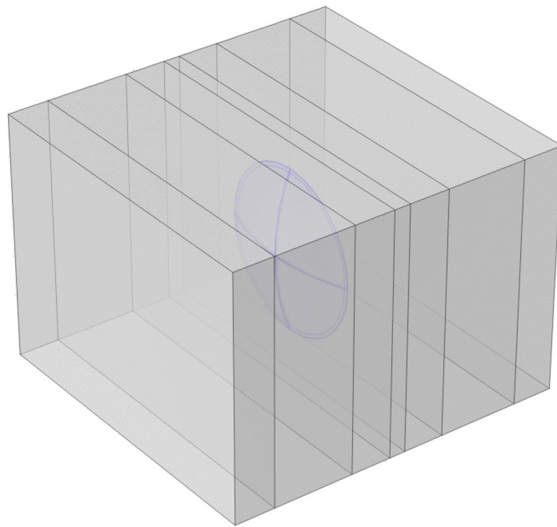


図 2.2.2 クレーター型波動ブラックホールありの壁

以上が音波を当てる場合の計算方法である。

壁材を直接叩いた場合の計算方法は以下の通りである。

- 1) COMSOL 上で幅 4000 mm、厚さ 200 mm、高さ 3000 mm 材質がコンクリートの壁を作成し (図 2.2.3)、半径 1000 mm のクレーター型波動ブラックホールを設定する (図 2.2.4)。なお、コンクリートの損失係数は 0.05 とする。(クレーター型波動ブラックホールは壁の中央部を中心に半径 1000 mm の大きさで、中心に向かって  $y=x^{2.2}$  の曲線を描き薄くなるものである。)
- 1) 壁面前方に幅 4000 mm、奥行き 2000 mm、高さ 3000 mm の空間を作成し、3 つに分割する。分割の際に生じた面の一つを受音面として設定する。
- 2) 後方の壁面上において幅 1000 mm、高さ 500 mm の位置に点を設定し、壁面に対して垂直に 1 N の力を加える。
- 3) (1)で作成した受音面での 0~250 Hz 間の各周波数における放射エネルギーレベルを求める。

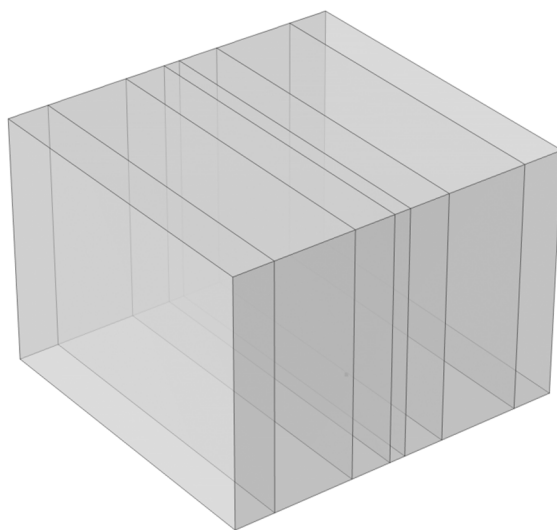


図 2.2.3 クレーター型波動ブラックホールなしの壁

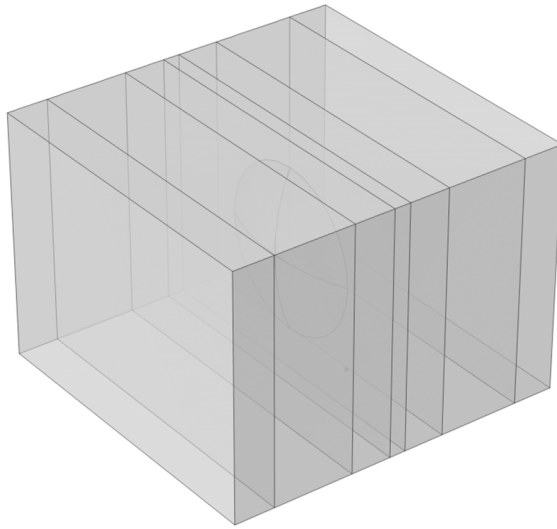


図 2.2.4 クレーター型波動ブラックホールありの壁

以上が計算方法である。

### 3 結果・考察 1

#### 3.1 波動ブラックホール再現 結果・考察

波動ブラックホールの再現による計算結果のグラフを以下に示す。

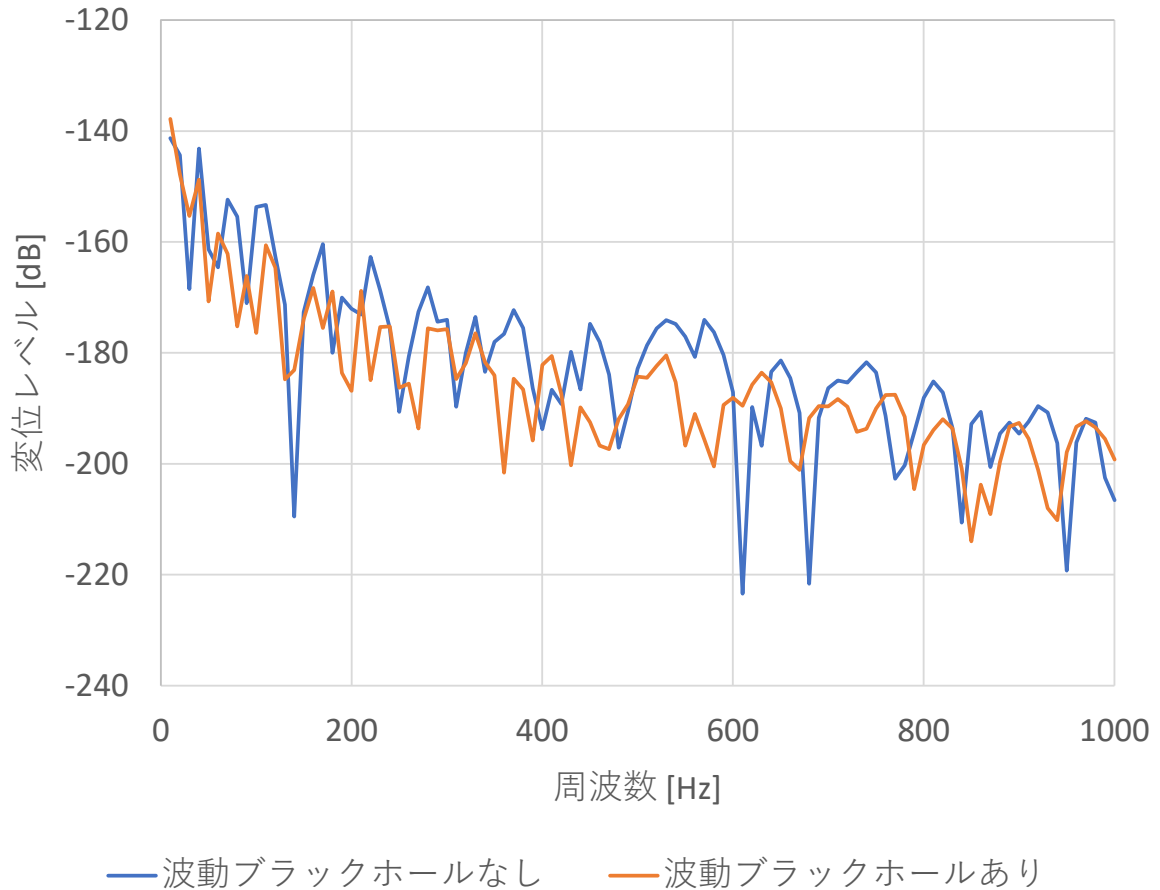
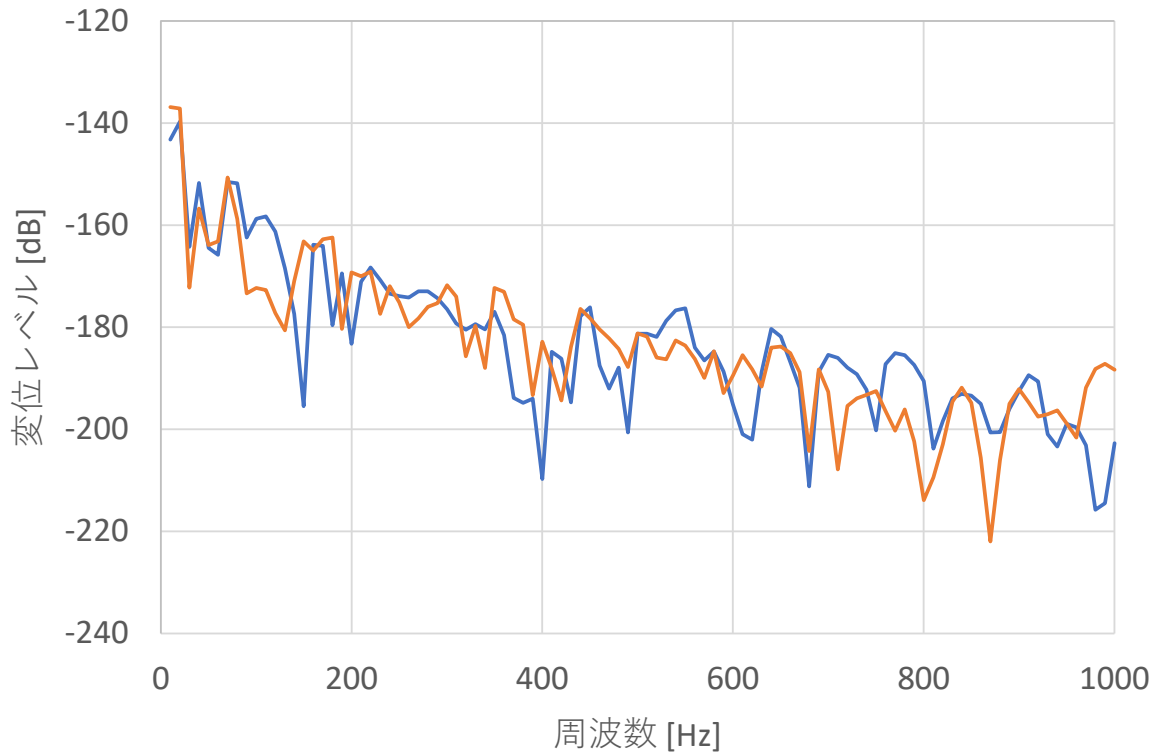


図 3.1.1 波動ブラックホール再現結果

図 3.1.1 のグラフは横軸が周波数[Hz]、縦軸が変位[dB]を表す。変位の値が小さい程制振性があると言える。このグラフでは、0~1000 Hz 間の大部分で波動ブラックホール有の板の方が変位が小さく、制振効果があることが読み取ることができる。特に 500~600 Hz 間の制振効果が顕著である。このことから COMSOL を用いた波動ブラックホールの再現は問題なく行えることがわかった。

続いて、クレーター型波動ブラックホールの再現による研究結果を以下に示す。





— クレーター型波動ブラックホールなし  
— クレーター型波動ブラックホールあり

図 3.1.2 クレーター型波動ブラックホール再現結果

図 3.1.2 のグラフは図 3.1.1 と同様、横軸が周波数[Hz]、縦軸が変位[dB]を表す。400 Hz 付近ではクレーター型波動ブラックホール無しの方が変位は小さいものの、それ以外の大部分ではクレーター型波動ブラックホール有りの方が変位が小さく、制振効果があると読み取ることができる。特に 700~900 Hz 間での制振効果が顕著である。

このことから COMSOL を用いたクレーター型波動ブラックホールの再現は問題なく行えることがわかった。

波動ブラックホール、クレーター型波動ブラックホールのどちらも COMSOL を用いた再現が可能であることから、研究目的である波動ブラックホールの建材への適用に関しても COMSOL を用いてシミュレートが可能であると考えられる。

### 3.2 壁材への適用 結果・考察

壁材への適用実験による結果を以下に示す。

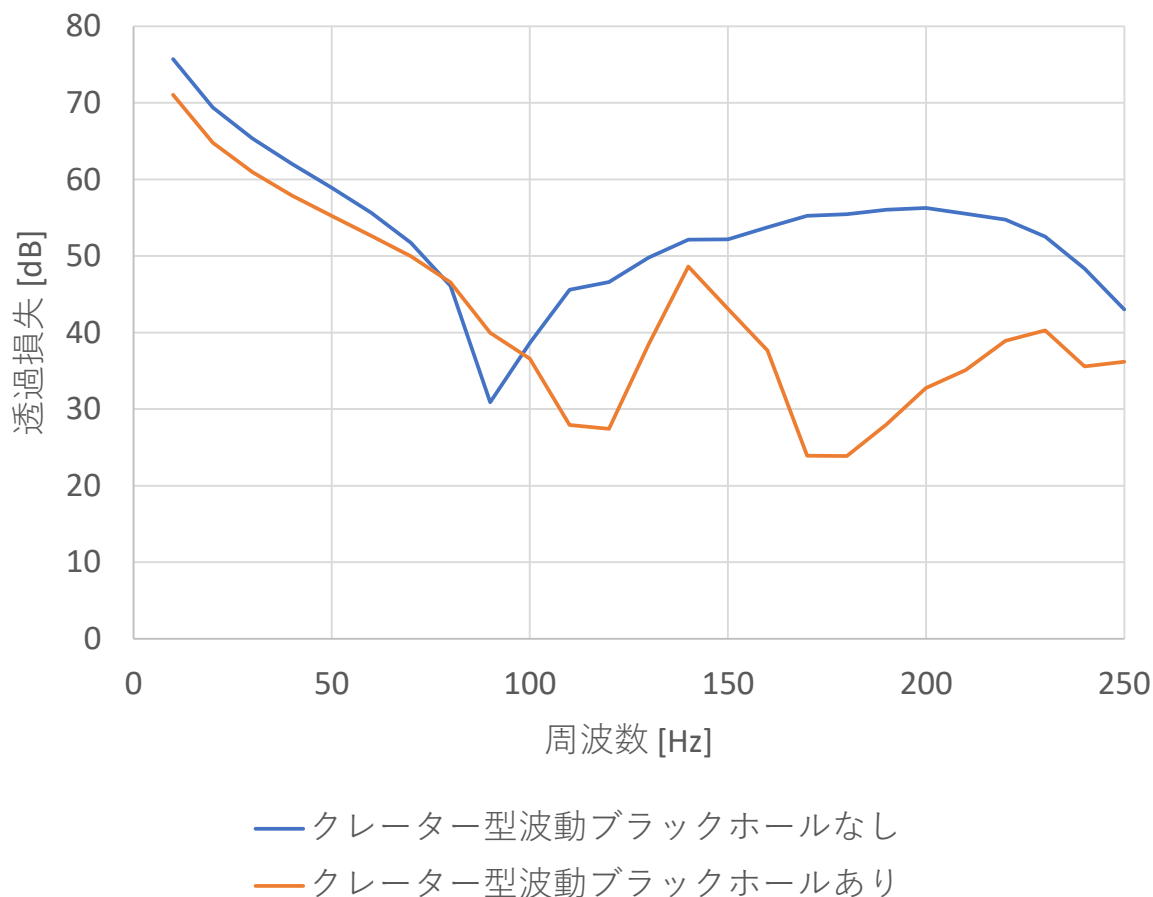


図 3.2.1 音波に対する波動ブラックホールの遮音効果

図 3.2.1 グラフは壁材に音波を当て、壁材の遮音性能を測定した実験の結果である。

横軸が周波数[Hz]、縦軸が透過損失[dB]を表しており、透過損失が大きいほど遮音効果があると判断することができる。

グラフより、90 Hz 付近以外では波動ブラックホール有りの方が波動ブラックホール無しに比べ透過損失が小さく、遮音効果が少ないことがわかる。このことから、音波に対する遮音性能という観点で波動ブラックホールは壁材には適していないと言える。

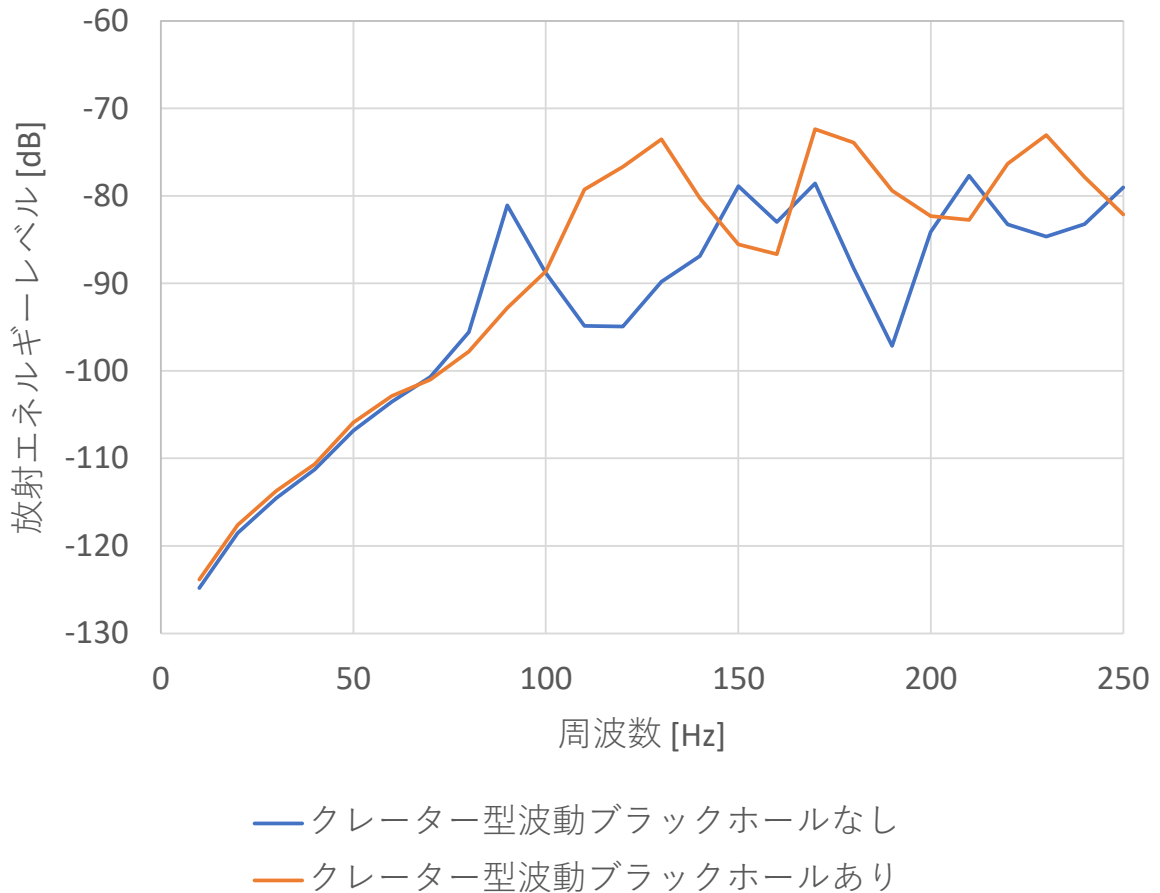


図 3.2.2 振動に対する波動ブラックホールの遮音効果

図 3.2.2 のグラフは壁材に直接加振力を加え、壁材の遮音性能を測定した結果である。横軸が周波数[Hz]、縦軸が放射エネルギーレベル[dB]を表す。

グラフより、70~100 Hz 間や 150 Hz や 210 Hz 付近において波動ブラックホール有りの方が波動ブラックホール無しに比べ放射音圧エネルギーレベルが小さく、若干の遮音効果が確認されるが、それ以外の多くの周波数では逆効果となっていることがわかる。このことから、振動に対する遮音性能という観点において、波動ブラックホールは壁材に適していないといえる。

音波、振動に対する波動ブラックホールの遮音性能に関する予測結果から以下のことが考察できる。透過損失が小さくなった理由として考えられるのが、壁の厚さが薄

くなることで、質量則に基づき遮音性能が低下したということである。波動ブラックホールは振動に対して反射波が小さくなるというメタマテリアルとしての性能を持つが、遮音という観点においてはその効果を十分に発揮できない可能性がある。

### 3.3 目的の修正

3.2 の結果より、従来の波動ブラックホールの壁材適用が困難であることから、研究目的の修正が必要と考えた。そのため、「材質変化による波動ブラックホールの開発」を新しい目的として研究を行うこととした。この目的の設定意図は以下の通りである。

今回、波動ブラックホールの建材への適用にあたり問題となったのは波動ブラックホール部分の壁材が薄くなることで遮音性能が低下するということである。この問題を解決するために、波動ブラックホール部分の厚さと壁材の厚さを等しくすることができれば、遮音性能を改善することができるのではないかと考えた。既往研究で紹介した粘性弾性材を充填し厚さを確保する、もしくは、材質を厚さ一定で密度やヤング率を変化させることによって波動ブラックホール部分を再現することができれば、3.2 で問題となった遮音性能を確保し、建材への適用が可能となると思われる。また、従来の波動ブラックホールの問題点であった、薄さによる耐久性の少なさと、先端部分が鋭利になることから生まれる危険性に関しても、厚さを確保することができれば解決することが可能となる。

## 4 計算方法 2

### 4.1 波動ブラックホール凹み部分へのシリコンの充填

材質変化による波動ブラックホールの開発にあたり、1つ目の実験として、既往研究で紹介した粘性弾性材を充填させることによる厚さの確保を試みた。本計算では既往研究同様、粘性弾性材としてシリコンを用いた。計算方法の詳細は以下の通りである。

- 1) COMSOL 上で幅 5000 mm、奥行き 5000 mm、厚さ 100 mm、材質がコンクリートの板を 2 枚作成し、波動ブラックホールとなる部材を接合する。なお、コンクリートの損失係数は 0.05 とする。(波動ブラックホール部分は材質がコンクリート、幅 5000 mm、奥行き 1000 mm、厚さ 100 mm で、端部に向かって  $y=x^{2.2}$  の曲線を描き薄くなるものである)
- 2) 作成した板の波動ブラックホール部分に(図 4.1.3、図 4.1.4)の青色部分のように材質がシリコンの部材をそれぞれ異なる厚さで充填させる。なお、シリコンの損失係数は 0.20 とする。
- 3) それぞれの板の上面中央部(幅 2500 mm、奥行き 2500 mm、高さ 100 mm 位置)に加振点を設定し、下方向に向かって 1N の力を作用させる。
- 4) それぞれの板の下面中央部(幅 2500 mm、奥行き 2500 mm、高さ 0 mm 位置)に受振点を設定し、0~1000 Hz において受振点の各周波数における板部材の変位を計算する。

図 4.1.1 はシリコンを薄く充填、図 4.2.2 はシリコンを厚く充填した図であり、図 4.1.3、図 4.1.4 はシリコン部分の詳細図である。

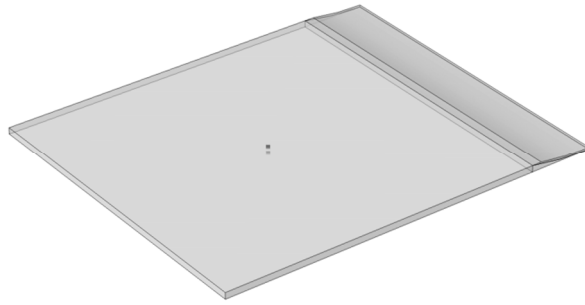


図 4.1.1 シリコン充填 (薄)

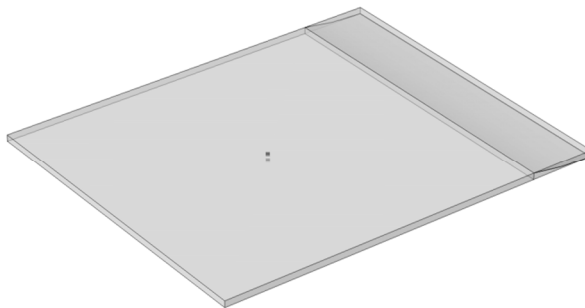


図 4.1.2 シリコン充填 (厚)

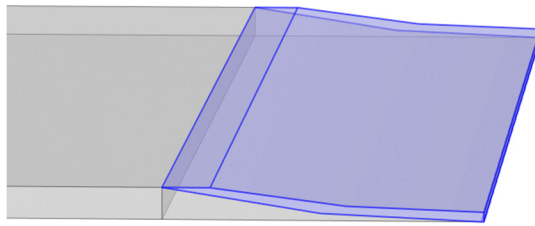


図 4.1.3 シリコン充填部分詳細図（薄）

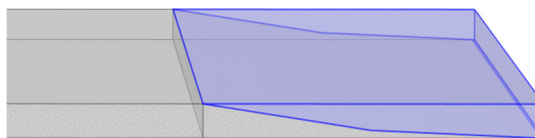


図 4.1.4 シリコン充填部分詳細図（厚）

以上が波動ブラックホール凹み部分へのシリコン充填に関する計算方法である。

#### 4.2 材質変化による波動ブラックホールの開発

厚さ一定の波動ブラックホールを開発する為、従来形状を変えることで制振効果を得ていた波動ブラックホールの形状を変化させず、代わりに材質の密度・ヤング率を変化させることで同等の効果を得られるかを検討する。従来の波動ブラックホールは端部に向かうに従い薄くなっていくことから、密度、ヤング率が低下していく為、端部に行くに従い密度・ヤング率を低下させることで波動ブラックホールを再現する。本研究では従来の波動ブラックホール（以後接合型波動ブラックホールとする）、クレ

ーター型波動ブラックホールの2種類の形状の開発を行った。計算方法の詳細を以下に述べる。

#### 接合型波動ブラックホールの開発

- 1) COMSOL 上で幅 300 mm、奥行き 300 mm、高さ 5 mm で材質がアルミの板を作成する。なお、アルミの損失係数は 0.01 とする。
- 2) 波動ブラックホールとなる部分を作成する、今回は①~③の3種類の波動ブラックホール部分を作成した。それぞれ幅が 300 mm、高さ 5 mm であり、奥行きと密度・ヤング率を変化させている。図 4.2.1 と図 4.2.2 に①~③の奥行きと密度・ヤング率の変化を示す。また、図 4.2.3~5 に①~③の形状を示す。また、それぞれの波動ブラックホールの上には 1 mm 厚のシリコンを設置する。なお、シリコンの損失係数は 0.20 とする。


	①	②	③
板側	10	1	50
	10	2	25
	10	3	13
	10	6	6
	10	13	3
	10	25	2
	10	50	1
	10		
	10		
奥側	10		

図 4.2.1 奥行き [mm]




	①	②	③
板側	2500 / 35	2500 / 35	2500 / 35
	2300 / 18	2300 / 18	2300 / 18
	2100 / 9	2100 / 9	2100 / 9
	1900 / 5	1900 / 5	1900 / 5
	1700 / 2.5	1700 / 2.5	1700 / 2.5
	1500 / 1.3	1500 / 1.3	1500 / 1.3
	1300 / 0.7	1300 / 0.7	1300 / 0.7
	1100 / 0.4		
	900 / 0.2		
奥側	700 / 0.1		

図 4.2.2 密度[ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] / ヤング率[GPa]

上記の表のように波動ブラックホール部分を作成し、接合させる。

- 3) 板材上面（幅 150 mm、奥行き 100 mm、高さ 5 mm 位置）に加振点を作成し、下方向に向かって 1 N の力を加える。
- 4) 板材下面（幅 150 mm、奥行き 200mm、高さ 0mm 位置）に受振点を作成し、0~4000 Hz の各周波数における板部材の変位を計算する。

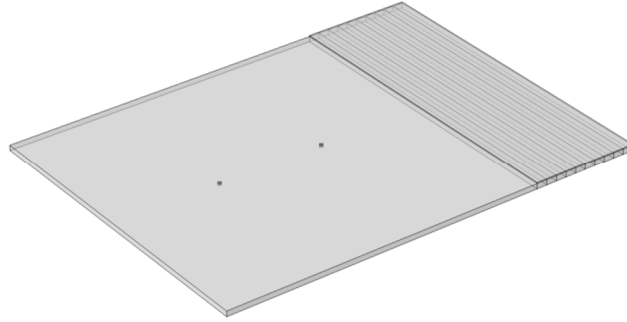


図 4.2.3 ①の波動ブラックホール

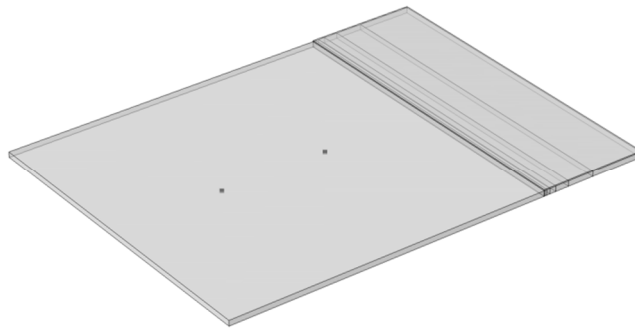


図 4.2.4 ②の波動ブラックホール

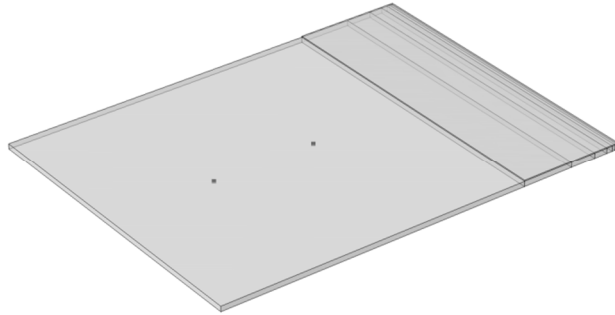


図 4.2.5 ③の波動ブラックホール

以上が接合型波動ブラックホール開発の研究方法である。

#### クレーター型波動ブラックホールの開発

- 1) COMSOL 上で幅 300 mm、奥行き 300 mm、高さ 5 mm で材質がアルミの板を作成する。なお、アルミの損失係数は 0.01 とする。
- 2) 板中央部(幅 150 mm、奥行き 150 mm 位置)を中心に半径 100 mm の円盤を作成し、円盤を図 4.2.6 のように 10 分割する。その後、分割された円の密度・ヤング率を変化させる。また、クレーター型波動ブラックホールの上には 1 mm 厚のシリコンを設置する。なお、シリコンの損失係数は 0.20 とする。
- 3) 板材上面(幅 150 mm、奥行き 20 mm、高さ 5 mm 位置)に加振点を作成し、した方向に向かって 1 N の力を加える。

- 4) 板材下面(幅 150mm、奥行き 280mm、高さ 0mm 位置)に受振点を作成し、0~4000 Hz の各周波数における板部材の変位を計算する。

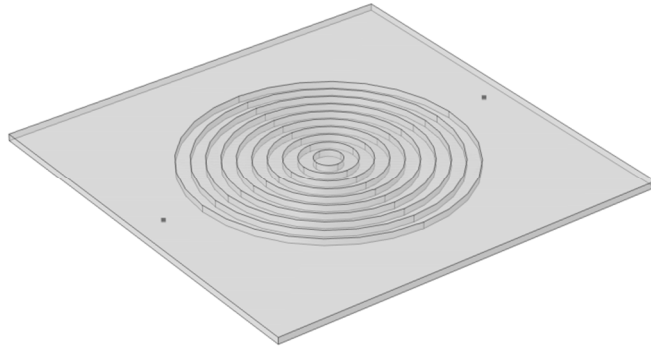


図 4.2.6 材質変化によるクレーター型波動ブラックホール

以上が材質変化による波動ブラックホール開発の研究方法である。

## 5 結果・考察 2

### 5.1 波動ブラックホール凹み部分へのシリコンの充填 結果・考察

波動ブラックホール凹み部分へのシリコンの充填を行った研究の結果は以下の通りである。

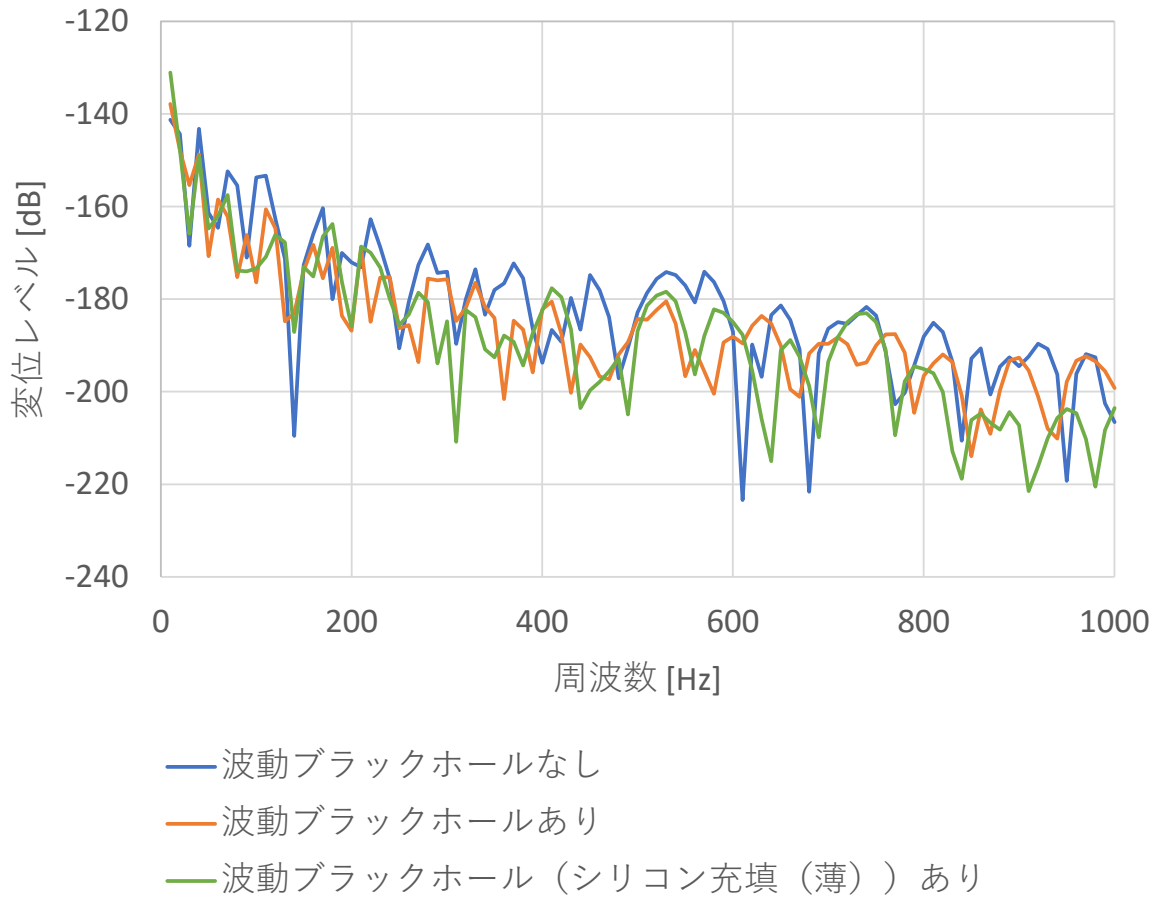


図 5.1.1 シリコン充填（薄） 結果

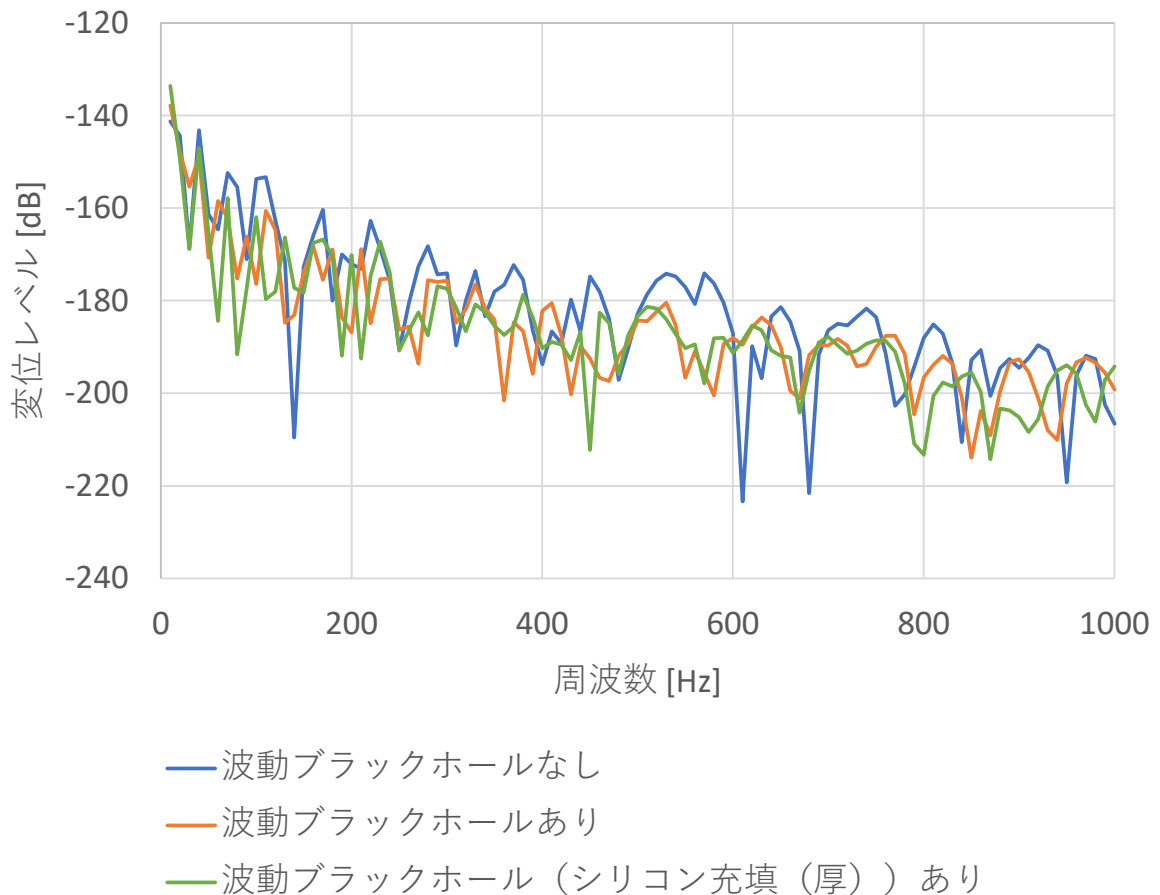


図 5.1.2 シリコン充填(厚) 結果

図 5.1.1 と図 5.1.2 のグラフは波動ブラックホールなしの場合、従来の波動ブラックホールの場合、粘性弾性材（シリコン）ありの場合の三つを比較したもので、どちらも横軸が周波数[Hz]、縦軸が変位[dB]を表し、変位の値が小さいほど制振効果が高いことを示す。

まず、図 5.1.1 について、200~400 Hz や 800 Hz 以降においてはシリコンがある場合の方が波動ブラックホールなし、ありの双方と比べて変位が小さく、制振効果が高いと言える。全体的にも波動ブラックホールなしの変位よりも小さい為、若干ではあるがシリコンの充填により制振効果が向上したと言える。

続いて、図 5.1.2 について、800 Hz や 900 Hz 付近では薄く充填したシリコン同様の 2 つのデータより変位が小さいことから制振効果が高いと言える。しかし、全体的には従来の波動ブラックホールとほぼ同等の結果であることから、シリコン充填による制振効果の向上は期待できないと言える。

以上のことから考察できることは次の通りである。波動ブラックホールの形状を有していれば、凹み部分に別の薄い材質を充填しても同様に制振効果を得ることが可能であり、クレーター型の波動ブラックホールにおいても薄いシリコンの充填が有効となる可能性が高いと考えられる。今回はシリコンを充填したが、他の材質でも同様の効果が得られれば、建材として使用した際に音の透過を最大限に抑えることが可能となる。

## 5.2 材質変化による波動ブラックホールの開発 結果・考察

材質変化による接合型波動ブラックホールの再現結果は以下の通りである。

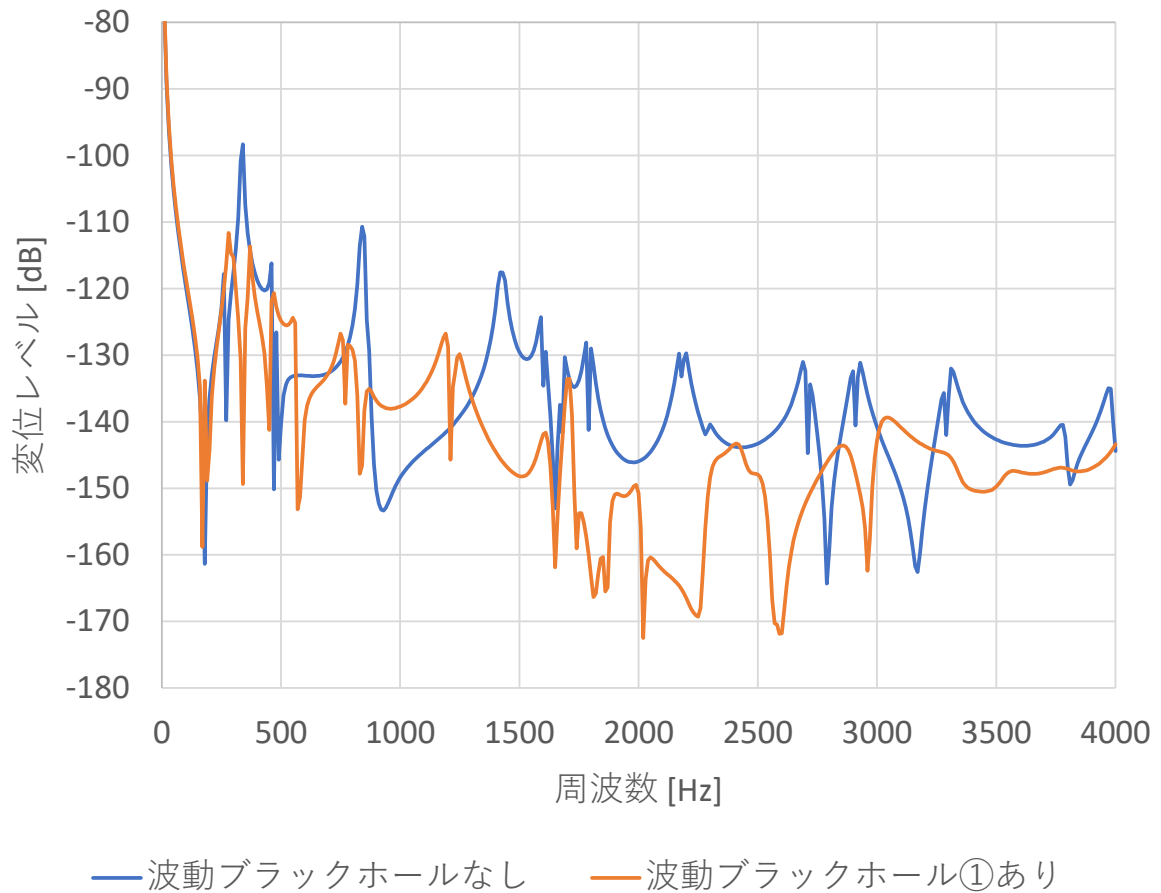


図 5.2.1 材質変化による波動ブラックホール再現 結果①



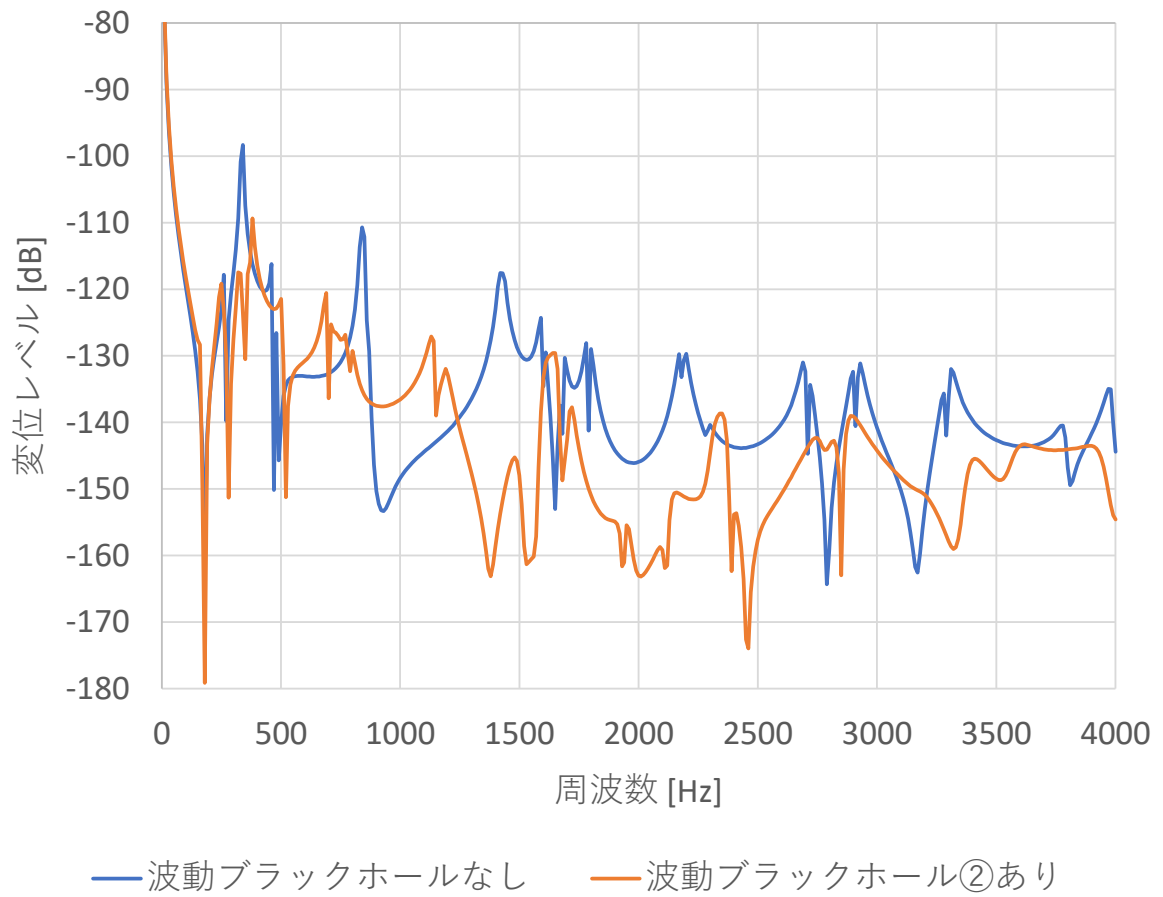
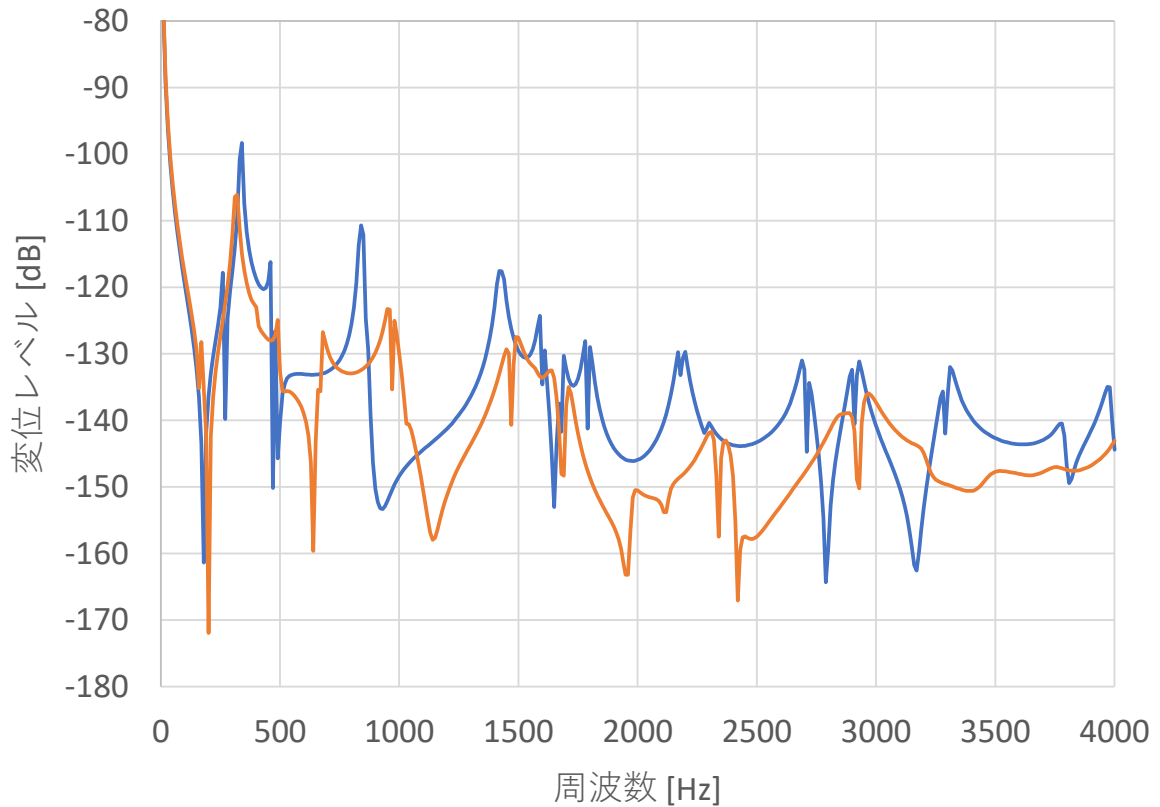


図 5.2.2 材質変化による波動ブラックホールの再現 結果②



— 波動ブラックホールなし      — 波動ブラックホール③あり

図 5.2.3 材質変化による波動ブラックホールの再現 結果③

図 5.2.1~5.2.3 のグラフは 4.2 にて説明した①~③の部材と波動ブラックホール部分なし（グラフ上の材質変化なし）の部材の変位を表し、比較したものである。それぞれ横軸が周波数[Hz]、縦軸が変位[dB]を表し、変位が小さいほど制振効果があることを示す。

①の等間隔に材質を変化させた部材について、図 5.2.1 のように、波動ブラックホールなしの場合と比較して、1300 Hz 以上の広範囲で変位が小さく、制振材として有効である可能性が示唆される結果となった。

②の部材についても、図 5.2.2 のように、波動ブラックホールなしの場合と比較して、1250 Hz 以上の広範囲で変位が小さく、制振材として有効である可能性が示唆される結果となった。

③の部材については、図 5.2.3 のように、波動ブラックホールなしの場合と比較して、1100 Hz 以上の広範囲で変位が小さく、制振材として有効である可能性が示唆される結果となった。ただし、その効果は①や②の場合に比べれば若干小さいように見える。

以上の結果から考察できることを以下の通りである。

今回の結果では 1000 Hz 付近以上の幅広い周波数帯で制振効果を得ることができた。そのため、密度とヤング率を変化させることで波動ブラックホールと同様の制振効果が得られる可能性が示唆された。今回は 3 パターンの変化割合でしか実験を行わなかったが、より細かい密度・ヤング率の変化を行えばさらに高性能な波動ブラックホールを得ることが可能となるかもしれない。

材質変化によるクレーター型波動ブラックホールの結果は以下の通りである。

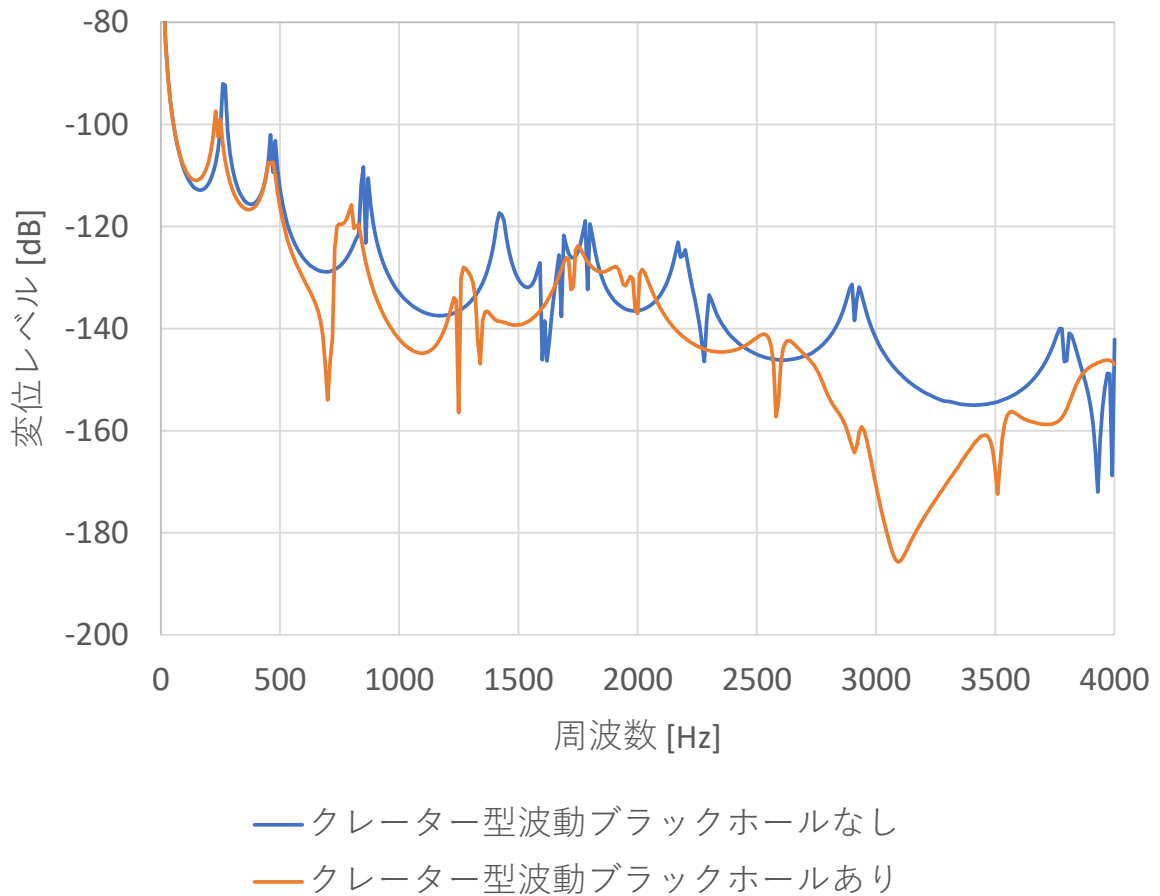


図 5.2.4 材質変化によるクレーター型波動ブラックホールの再現 結果

図 5.2.4 は材質変化によるクレーター型波動ブラックホールの変位を表したものである。横軸が周波数[Hz]、縦軸が変位[dB]を表し、変位が小さいほど制振効果があることを示す。

2700~3800 Hz 間では波動ブラックホールなしの場合よりも大幅な変位低減効果が得られており、制振材として有効である可能性が示唆される結果となった。

このことから考察できることは以下の通りである。

ある周波数帯で制振効果を得られたことから、密度とヤング率を変化させることで波動ブラックホールと同様の制振効果が得られる可能性が示唆された。しかしながら、接合型波動ブラックホールと異なり、クレーター型波動ブラックホールの方は制振効果が得られる周波数が限定的であった。一方で、その効果量は接合型波動ブラックホールよりも大きかった。板に大きなクレーター型波動ブラックホールをひとつ設置する場合と、小さなクレーター型波動ブラックホールを複数設置する場合の比較などを行い、クレーター型波動ブラックホールが占める面積と効果の得られる周波数帯、効果量を検討すれば、より良い制振材となる可能性がある。

## 6 おわりに

### 6.1 総括

波動ブラックホールの凹み部分へのシリコン充填は、薄く貼り付けることで制振効果が向上することがわかった。また、材質変化による波動ブラックホールの再現では接合型波動ブラックホールは幅広い周波数帯で制振効果を得ることができ、クレータ型波動ブラックホールでは特定の周波数帯で大きな制振効果を得られることがわかった。

### 6.2 今後の課題

本研究における大きな目的であった「波動ブラックホールの建材への適用」に関して、現状実現は困難であると言える。しかしシリコン充填が有効であったことから他の物質の充填が可能であるかを試し、同様に有効性を示すことができれば、建材に適した充填材の適用により実現可能になるであろう。

また波動ブラックホールの効果が材質に関連していることから、密度・ヤング率の変化割合をより多くのパターンで研究を進め、法則を見つける必要がある。ただし現状物体の形状を変えずに密度・ヤング率のみを変更する技術が存在しない為、実現は難しいと言える。

## 参考文献

- [1] Mironov, Soviet Physics-Acoustics 34, 318– 319, 1988.
- [2] Krylov, Kralovic *et al.*, Journal of Sound and Vibration 329, 4672-4688, 2010.
- [3] Krylov, Tilman, Journal of Sound and Vibration 274(3–5) ,605–619, 2004.
- [4] Krylov, Acta Acustica united with Acustica 90(5), 830–837, 2004.
- [5] Oberst, Akustische Beihefte, Helt 4,181-194, 2019.
- [6] O'Boy, Krylov, Journal of Sound and Vibration 330, 2220-2236, 2011.