

フォノンニッククリスタルを用いた遮音材の開発

関西大学 環境都市工学部 建築学科

建築環境工学第一研究室

建 15-0118 山田 蒼

指導教員 豊田 政弘 准教授

目次

1 はじめに.....	2
1.1 既往研究.....	2
1.2 研究目的.....	3
2.1 解析方法.....	4
2.2 解析条件.....	4
2.3 解析モデル.....	5
3 結果と考察.....	7
3.1 空隙の有無と空隙の形状による性能の比較.....	7
3.1.1 比較条件.....	7
3.1.2 結果と考察.....	8
3.2 空隙の寸法の違いによる性能の比較.....	9
3.2.1 比較条件.....	9
3.2.2 結果と考察.....	9
3.3 空隙同士の間隔を変えたときの効果の変化.....	10
3.3.1 比較条件.....	10
3.3.2 結果と考察.....	10
3.4 空隙を複層持つシリコンの効果の比較.....	11
3.4.1 空隙が複層ある場合の比較.....	11
3.4.2 二層の空隙の寸法を変えた場合の比較.....	12
3.4.3 結果.....	12
3.5 鉄板に貼り付けた場合の検討.....	13
3.5.1 比較条件.....	13
3.5.2 結果と考察.....	13
4 おわりに.....	14
参考文献.....	15

1 はじめに

1.1 既往研究

2011年、フランスの Bretagne らによって水中に泡を格子状に並べて発生させることにより低周波数帯の透過率が大きく低下するディップを生じさせるという研究が行われた [1]。低周波数帯の遮音には遮音材に厚みや重量を与える必要があり、より低周波数になるにつれ難しくなるが、この技術を用いることで泡の発生のみで低周波数帯の遮音を行うことができる。この技術は実際に海底での工事などから発生する低周波数帯の音から海の生物を守るための遮音方法として使用されている。2017年には Sharma らが水中ではなくシリコンのような弾性のある固体中に空隙を格子状に配置することにより同様の構造を再現した、フォノンニックリスタル構造と呼ばれるものを用いた音響性能についての研究を発表した [2]。Sharma らの研究では図1のようなモデルで解析を行い、PDMS (Poly Di-Methyl Siloxane) と呼ばれるシリコン中に空隙を空け、同様の構造を再現した場合にも Bretagne らの研究と同様、低周波数帯の透過率にディップを生じさせることがわかっている。また、これらの性能は Minnaert 共鳴、Fabry-perot 共鳴などの音の共鳴によって得られるものだということがわかっている。

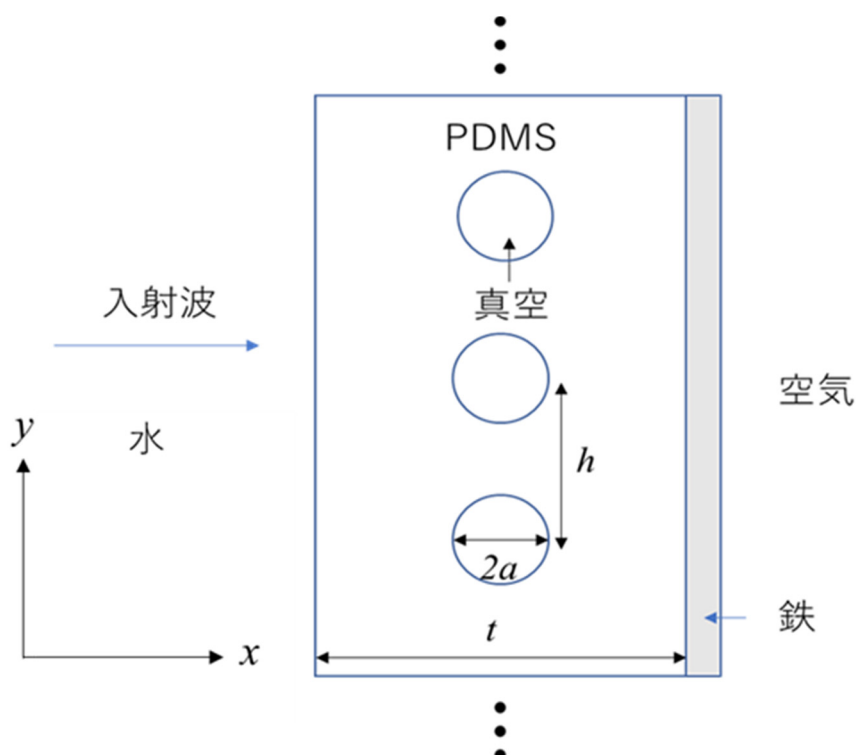


図1 既往研究[2]で扱われているモデル
(鉄板にPDMSが貼られ、水と空気の間で使用される)

1.2 研究目的

既往研究[2]では、フォノンニッククリスタル構造を持つシリコンを用いることで特定の周波数帯に透過率のディップが生じ、遮音性能が高くなることが明らかにされている。しかし、既往研究では水中での使用のみが考えられている。そこで、本研究ではこのフォノンニッククリスタル構造を応用し、地上で使用される遮音材として利用することを目的とする。具体的には、空気中でこの構造を用いた遮音材を設置した場合に同様な性能を示すことができるのか、また、フォノンニッククリスタル構造の空隙の大きさなどの各条件を変化させることで遮音性能がどのように変化するのかを数値解析を用いて求めた値を基に比較を行う。この構造が遮音材として利用された場合、低周波数帯に生じる透過率のディップが大きな特徴となることが考えられる。そこで、特にこのディップに対しての検討を行い、低周波数帯に特化した遮音材としての利用を目指す。

2 研究方法・研究条件

2.1 解析方法

本研究では、既往研究[2]でも用いられた有限要素解析ソフトである COMSOL Multiphysics を用いて計算を行い、透過率、反射率のグラフを取得する。それらのグラフを基に、各条件の違いによって遮音性能にどのような変化が現れるかを考察する。

2.2 解析条件

本研究では空気中での使用を目的とするため空気中にフォノンニックリスタル構造を持つシリコンを設置したモデルを扱う。今回の解析では既往研究同様 PDMS と呼ばれるシリコンの使用を想定し、密度 $\rho_s=1000$ [kg/m³]、せん断弾性率 $G_s=0.6$ [MPa]、体積弾性率 $K_s=1$ [GPa]として解析を行う。空気は密度 $\rho_a=1.2$ [kg/m³]、音速 $c_a=340$ [m/s]とする。また、三次元での解析を行う場合、解析に長時間がかかってしまうことから、ここでは二次元でモデル化し、解析を行う。二次元で解析を行った場合、筒状の空隙の解析を行うことになるため本来用いたい球状や立方体の空隙とは異なる形状になるが、二次元でもそれらとほとんど同じ値を示すと考え、二次元解析を行うこととする。

2.3 解析モデル

図2はフォノンニックリスタル構造を持つシリコンを遮音材として空気中に配置した状態を二次元の簡単な図に表したものである。シリコンは y 軸方向、 z 軸方向に同様なものが続くものとする。シリコンの厚さが l 、真空の正方形の空隙の1辺が r 、空隙同士の間隔が s である。また、3.4節で扱う複層の空隙は x 軸方向に空隙を増やしたものである。

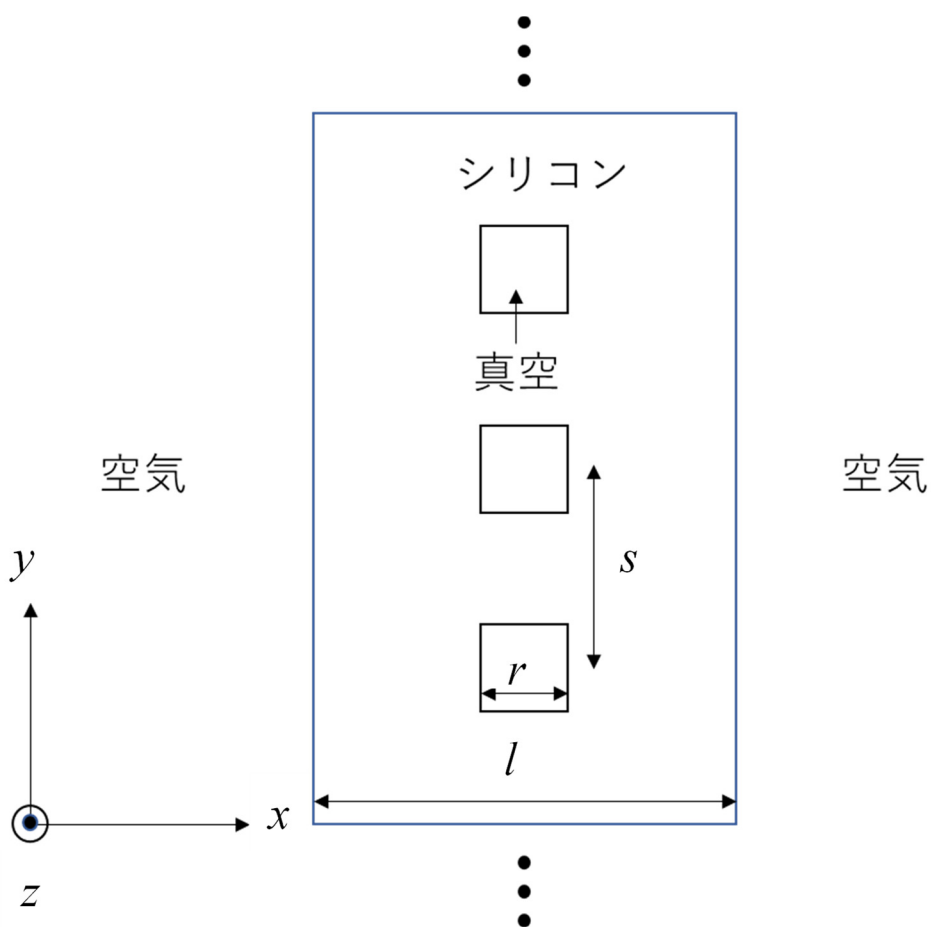


図2 フォノンニックリスタル構造の二次元モデル

今回使用した数値解析ソフト COMSOL では、図 3 のようなモデルを用いて解析を行った。これは図 2 のモデルから空隙を 1 つ含むように x 軸方向に切り取ったものである。辺 ad と辺 eh には線対称に同様のモデルが続く周期条件を付与することで空隙が格子状に並ぶフォニッククリスタル構造を再現する。反射率、透過率は領域 $abef$ から図中右方向に発せられる平面波によって線 bf 上で右向きに進む音波の音圧 p_i (入射波によるもの) と左向きに進む音波の音圧 p_r (反射波によるもの)、線 cg で右向きに進む音波の音圧 p_t (透過波によるもの) をそれぞれ取得し、音の強さ (インテンシティ) を $I=p^2/\rho c$ より求め、 I_r/I_i および I_t/I_i により反射率、透過率を周波数ごとに計算する。ここで、 ρc はそれぞれ媒質の密度と媒質中での音速、 I_r, I_t, I_i はそれぞれ反射波、透過波、入射波のインテンシティである。



図 3 COMSOL で使用したモデル

3 結果と考察

3.1 空隙の有無と空隙の形状による性能の比較

まずは、フォノンニックリスタルを含む場合と含まない場合ではどのくらいの効果が得られるのかについての検討を行う。また、実際に空隙を空ける場合、円より角形のほうが容易に作成できる場合があることから形状による効果の違いを確認し、大きく差がなければ角形を用いた解析を行う。

3.1.1 比較条件

x 軸方向のシリコンの厚さである l を 20 cm、 y 軸方向の空隙同士の間隔である s を 10 cm に固定する。図 4 のように空隙を含まないもの、1 cm × 1 cm の正方形を含むもの、その正方形を 45° 傾けたものを含むもの、正方形と同じ面積の円を含むものの四種類の解析を行い、結果を考察する。

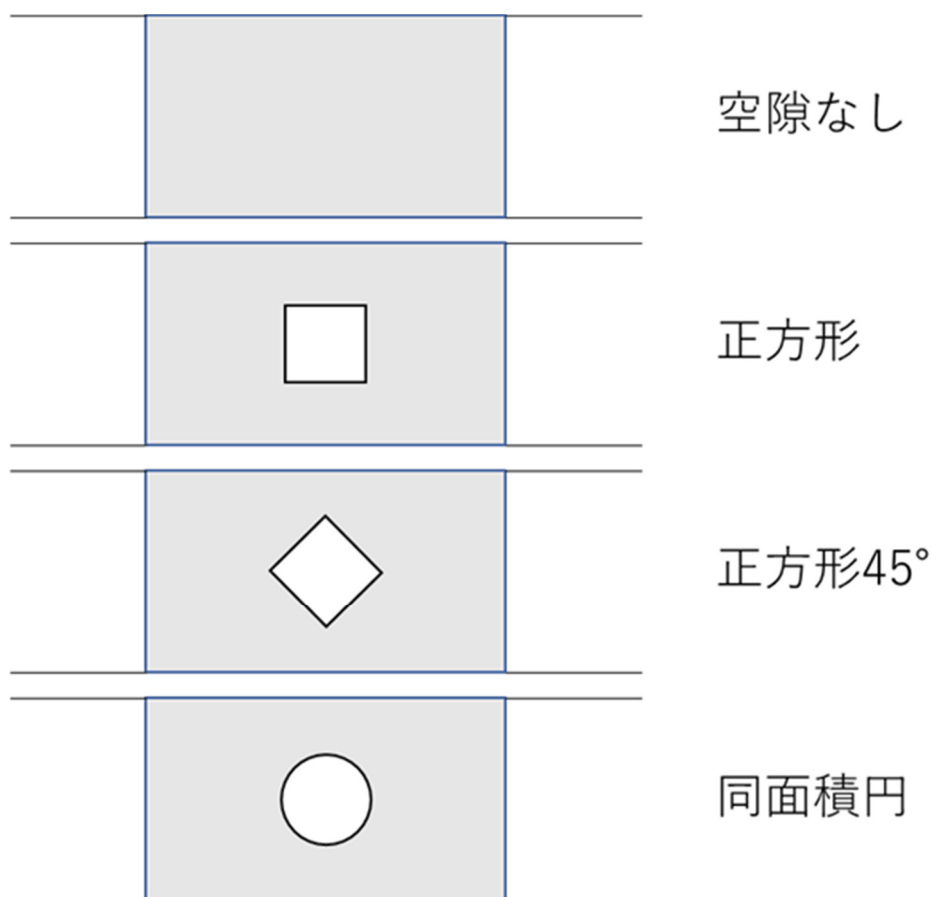


図 4 空隙の形状

3.1.2 結果と考察

図5、6より、反射率、透過率ともに空隙なしに比べてほとんどの周波数帯で遮音性能が高いといえる。また、正方形に関しては角度を変えても全く性能に変化がないことがわかる。正方形と円の比較では一番大きいディップは 10^2 倍ほどの違いがあるが正方形の時点で、 10^{-8} と十分に小さな透過率を示すことから正方形を用いても十分使用することができると考えられる。また、ディップの生じる周波数帯にも少し違いが見えるが、その他の条件でもディップの生じる周波数帯を変えることは可能であることから、今後の解析では正方形を用いることとする。また、空隙を含んだ場合の反射率はほぼ1であり、透過率に生じる影響に比べ十分小さいことから以降は透過率に焦点を当て考察を行うこととする。

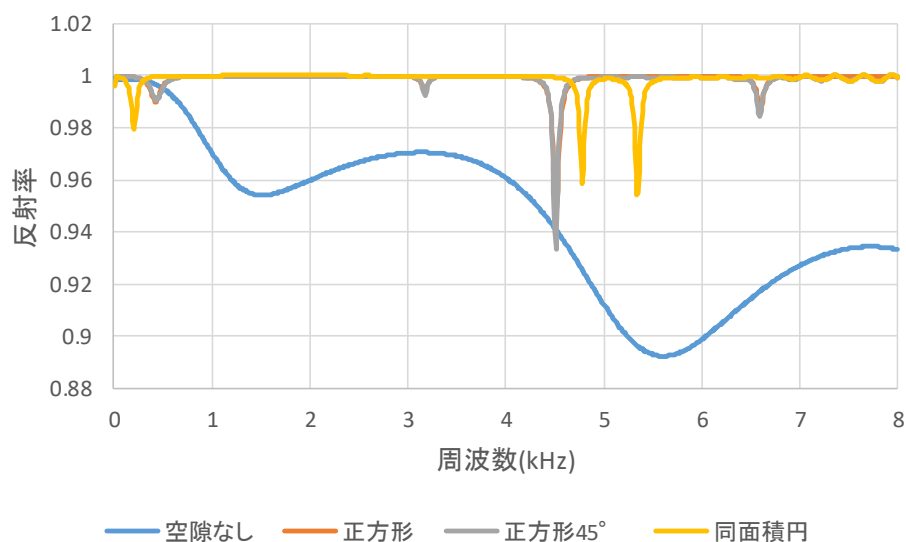


図5 空隙の有無と空隙の形状による反射率の比較

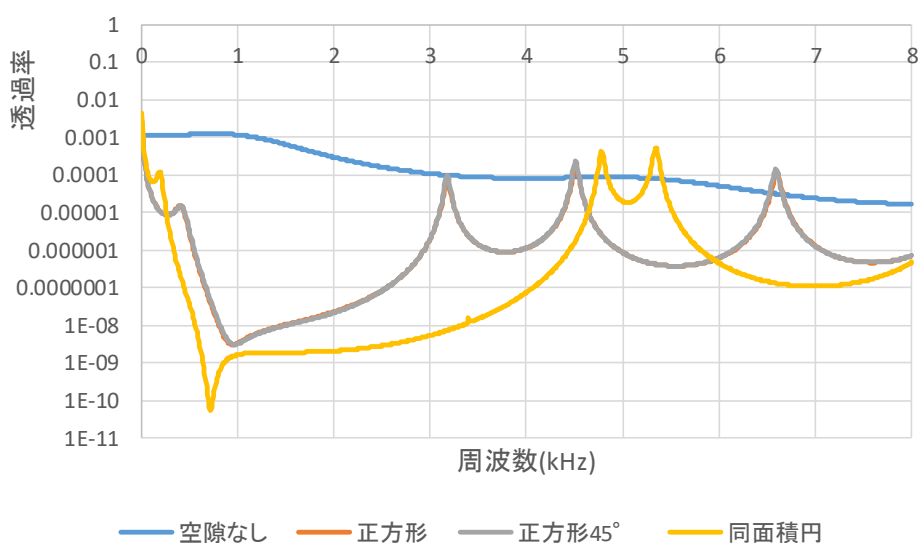


図6 空隙の有無と空隙の形状による透過率の比較

3.2 空隙の寸法の違いによる性能の比較

3.2.1 比較条件

空隙の寸法 r が変化することでどれほど性能に変化が起きるかの確認を行った。シリコンの厚さ l を 20 cm、空隙同士の間隔 s を 10 cm とし、空隙の大きさを 1 cm、2 cm、3 cm、4 cm と変え、数値解析の結果の比較を行った。

3.2.2 結果と考察

図 7 から、透過率のグラフ全体を見て空隙のサイズを大きくすると透過率は下がる傾向にあると確認できる。これについては空隙のサイズが大きくなるにつれ、空隙の共鳴による効果がより現れやすくなることが原因だと考えられる。また、0~1 kHz あたりでは寸法が大きくなるほどディップの位置は低周波数帯側に推移しているが 3 kHz 以上あたりでは寸法が大きくなるほど高周波数帯側へ推移していくことが見られる。既往研究[2]より、これは 800 Hz 付近に生じるディップと 3 kHz 以降の周期的なディップは異なる共鳴によるものであるからだと考えられる。

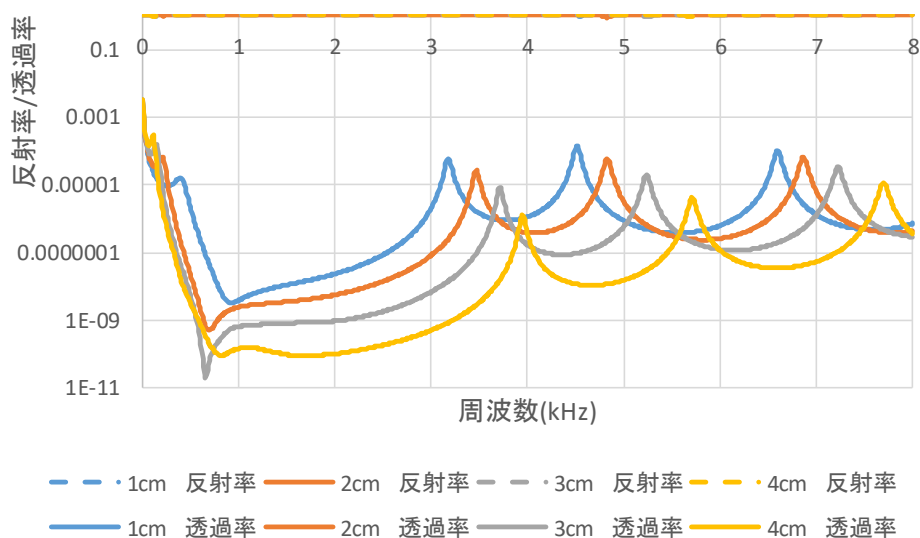


図 7 空隙の寸法の違いによる反射率、透過率の比較

3.3 空際同士の間隔を変えたときの効果の変化

3.3.1 比較条件

空際同士の間隔が変化するとどのように効果が変化するかについて比較を行う。空隙の寸法を一辺 1 cm の正方形、シリコンの厚さを 20 cm に固定し、空隙の間隔 s を 5 cm、10 cm、15 cm、20 cm と変化させ、性能の比較を行った。

3.3.2 結果と考察

図 8 から、間隔を一番小さい 5 cm にした場合、低周波数帯のみならず広い範囲において低い透過率を示し、高い遮音性能を持つと言える。理由としては空隙の寸法を考えたときと同様で、空隙同士の間隔が狭まり空隙が影響を与える範囲の割合がより大きくなった結果だと考えられる。また、空隙同士の間隔を狭めると、ディップの位置が高周波側数へ移動することがわかる。本研究では低周波数帯の遮音に特化した遮音材の開発を目指すため、この点には注意する必要があると考えられる。

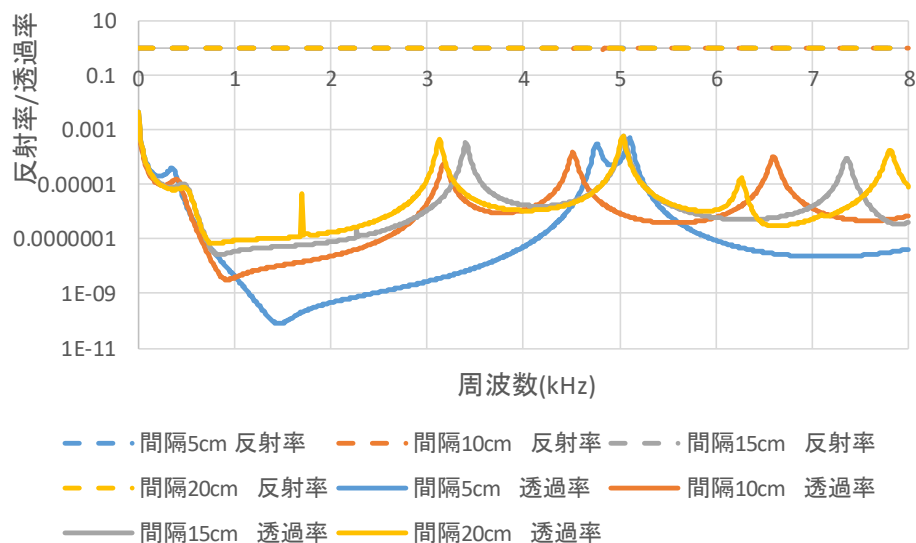


図 8 空隙同士の間隔を変えたときの反射率、透過率の比較

3.4 空隙を複層持つシリコンの効果の比較

シリコン中に空隙を複層持つ場合について二種類の比較を行った。一つ目は空隙の層が一層、二層と増えた場合にどのような変化があるのか、二つ目は二層の空隙を持つ場合に空隙の大きさが異なるとどのような違いがあるのかについて検討を行った。

3.4.1 空隙が複層ある場合の比較

複層の空隙を持つことによる効果の有無を確認するため、空隙のサイズを 1 cm、シリコンの厚さを 20 cm に固定し一層、二層、三層の空隙を持つ場合について比較を行った。

図9から、0~900 Hz あたりまではほとんど透過率には変化がないことが見られる。また、透過率の最小値が生じる周波数帯は空隙の個数では大きく変わらないことがわかる。4 kHz あたりまでは空隙の個数が多いほうが遮音性能は高くなるが、高周波数側では大きく変わらないことがわかる。

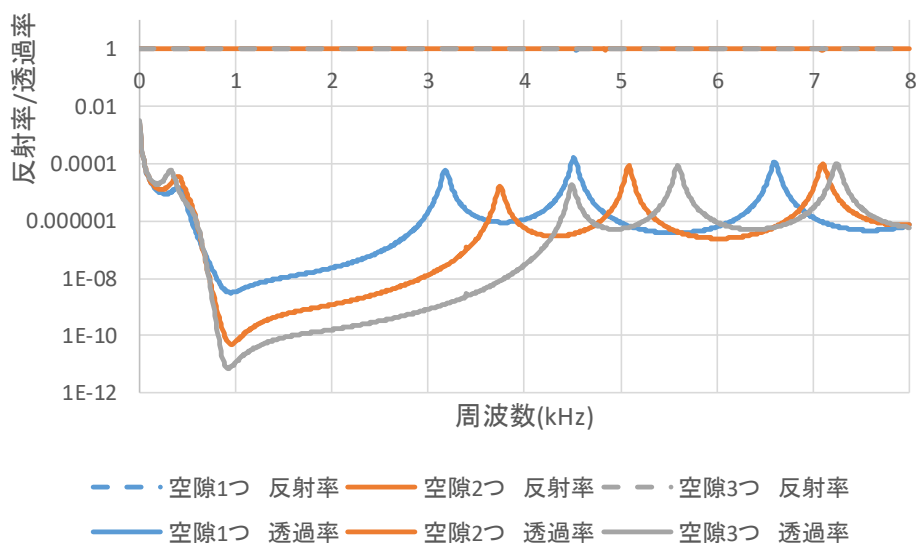


図9 空隙が複層ある場合の反射率、透過率の比較

3.4.2 二層の空隙の寸法を変えた場合の比較

20 cm のシリコン中に正方形の空隙が二層あることを想定し、空隙の寸法を 1 辺 1 cm、2 cm、3 cm と変えて性能を比較した。

図 10 から、透過率に関して全体的に見ると空隙の大きいほうがより遮音性能が高くなっていることがわかる。これは 4.2.2 項と同様にシリコン中の空隙の割合が高くなった影響ではないかと考えられる。また、4.2.2 項と比較すると 10^{-1} ほど小さい透過率を得られることがわかる。

3.4.3 結果

複層のフォノンニックリスタル構造は 1 層のみのものに比べ高い遮音性能を示すことが確認できた。また、空隙の寸法と周波数帯の関係も同様のものが見られた。二つの結果から複層を用いることで単層の状態よりもより高い性能が期待できる。

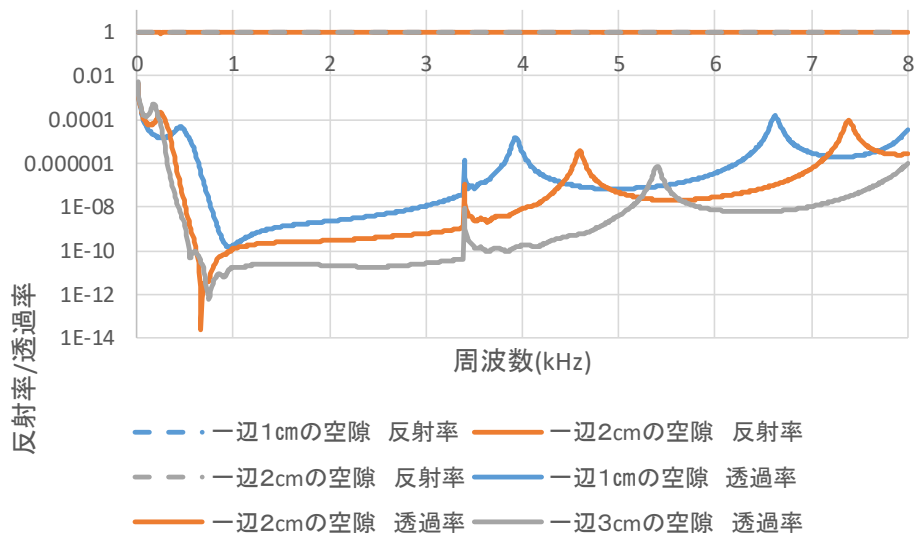


図 10 二層の空隙の寸法を変えた場合の反射率、透過率の比較

3.5 鉄板に貼り付けた場合の検討

前述の検討条件では空気中にフォノンニックリスタル構造を持つシリコンのみが存在するようなモデルを扱っているが、実際には板状のような固体に貼り付けて立たせた上で使用する必要があると考えられる。そこで、厚さ 1 cm の鉄板にシリコンを張り付けたものを用いた場合にどれほど結果に違いが出るのか比較した。

3.5.1 比較条件

1 cm 厚の鉄板に 20 cm 厚のフォノンニックリスタル構造を持つシリコンを貼り付けた場合を想定し解析を行った。空隙は 1 辺 1 cm の正方形とし、鉄板に挟まれていないシリコンのみの時の結果との比較を行った。

3.5.2 結果と考察

図 11 から、鉄板がある場合とない場合で 2 kHz あたりまでは大きく変わらないことがわかる。今回は鉄板を用いた場合のみしか検討できなかったが、実際に使用することを考えるとより安価な材料や厚さに関しても考察が必要である。今回の検討では、大きくグラフに変化が見られなかったことから、他の条件に関してもほとんど同様な値を得られるのではないかと考えられる。

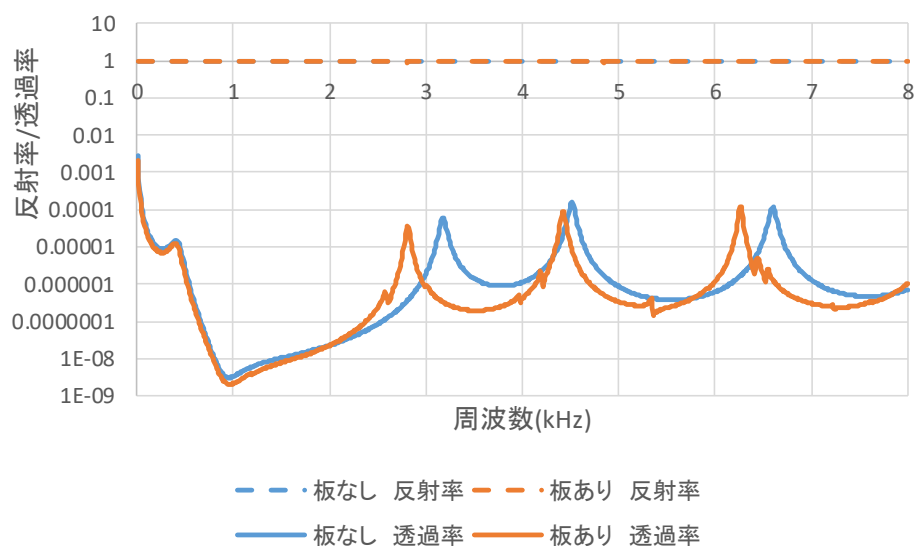


図 11 鉄板に張り付けた場合の反射率、透過率の比較

4 おわりに

本研究ではフォノンニッククリスタル構造を用いて、一部の周波数帯の遮音に特化した遮音材としての利用を目標とし、いくつかの条件ごとに解析、比較を行った。フォノンニッククリスタル構造を持たない場合に比べ、より優れた遮音性能を持つことがわかり、空隙の形状、寸法、間隔と複層の空隙を用いた場合にどのような性能の変化が見られるかについて確認することができた。また、実際に使用するために、ほかの物体に貼り付けた状態を想定した解析も行ったが性能が大きく変化することはないと確認することができた。しかし、今後の実用化を考える上ではまだ検討する必要があるものは多い。今回は PDMS を弾性のある固体として使用したが、他の種類のシリコンやゴムなどでも同様の性能が得られるのかについて検討し、より用意がしやすく性能が得られるものについて考察する必要がある。さらに、本研究では空隙の寸法、間隔、ならびに、空隙を複層用いた場合、他の材料に貼り付けた場合について性能がどう変わるかの解析しかできなかったが、一部の周波数帯に特化した遮音材を目指すのであれば、実際に遮音が要求されている周波数帯を調査し、その周波数帯にディップを合わせる最適な条件を求めるような考察が必要と考えられる。また、本研究では二次元化したモデルの解析のみしか行えなかったが、前述の通り、ほとんど同じ値を示すとの仮定のもとで解析を行ったため、三次元での解析を行い、同じ結果として考えてよいという確認を行う必要がある。最終的には簡易的な実験を行い、解析で得た値を実験値と比較し検証する必要がある。

参考文献

- [1] Alice Bretagne, Arnaud Tourin, Valentin Leroy, “Enhanced and reduced transmission of acoustic waves with bubble meta-screens”, *Applied Physics Letters*, 221906, 2011.
- [2] Gyani Shankar Sharma, Alex Skvortsov, Ian MacGillivray, Nicole Kessissoglou, “Acoustic performance of gratings of cylindrical voids in a soft elastic medium with a steel backing”, *Journal of the Acoustical Society of America* 141, pp.4694-4704, 2017.