

ソニッククリスタルを用いた遮音壁による  
バンドギャップ特性の予測

関西大学大学院 理工学研究科

環境都市工学専攻 建築学分野

19M6424 山田蒼

指導教員 \_\_\_\_\_

## 論文要旨

ソニッククリスタルとは、散乱体を周期的に配置する構造を指し、これを音波が通過する際に一部の周波数帯の透過が著しく減衰することが明らかになっている。この周波数帯は、バンドギャップと呼ばれ、散乱体のパラメータを変えることで、発生する周波数帯や減衰の度合は変化する。ソニッククリスタルを遮音壁として利用することを目指し、過去にも様々な研究が行われている。

ソニッククリスタル遮音壁を有効に扱うためには、バンドギャップを遮音したい騒音のピーク周波数に合わせることが重要であり、そのためには、散乱体のパラメータに対するバンドギャップの特性を事前に予測することが必要である。しかし、現状、これを予測する予測式などは開発されておらず、ソニッククリスタル遮音壁を実用するうえでの一つの課題である。そこで、本研究では、ソニッククリスタルによるバンドギャップ特性を簡易に予測する予測式の作成を行った。予測式は、数値解析による結果をもとに、回帰近似を行い作成し、散乱体同士の間隔と半径より、バンドギャップの最小透過率とその周波数を予測することができる。また、散乱体同士の間隔と半径以外のいくつかのパラメータについて、この予測式の適用を行うとともに、それぞれのパラメータによるバンドギャップ特性を観察することで、ソニッククリスタルの性能評価を行った。最後に、作成された予測式といくつかの条件によるソニッククリスタルのバンドギャップ特性の比較をもとに、幼稚園や保育園からの児童発声騒音を対象としたソニッククリスタルの製作を行い、挿入損失を測定した。その結果より、予測式と実際の測定値の比較を行い、予測式の精度の確認を行った。

予測式を用いることで、実測値についても、ある程度の予測が可能であった。しかし、実験による遮音効果は実用化には不十分なものであり、今後さらに複雑な条件によるソニッククリスタル遮音壁の開発が望まれる。本稿の予測式も、さらに多くの種類のソニッククリスタルへの適用や、異なる条件での実測値との比較などを行い、より精度の高いものへと改善する必要がある。

## 内容

1 はじめに.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	2
2 数値解析.....	3
2.1 解析条件とモデル.....	3
2.2 解析結果.....	5
2.3 データの分析.....	9
3 予測式の作成.....	14
3.1 回帰分析の方法.....	14
3.1.1 回帰分析の関数の決定.....	14
3.1.2 回帰分析の方法.....	15
3.1.3 作成された予測式.....	15
3.1.4 予測式と解析解の比較.....	16
3.2 乱入斜条件との比較.....	20
3.2.1 乱入斜条件での解析.....	20
4 様々なパラメータの予測式の作成.....	23
4.1 散乱体の断面形状による検討.....	23
4.1.1 検討するモデル.....	23
4.1.2 モデル1の結果.....	24
4.1.3 モデル2の結果.....	28
4.1.4 モデル3の結果.....	32
4.1.5 散乱体の断面形状による検討のまとめ.....	36
4.2 散乱体の配置方法による検討.....	37
4.2.1 検討するモデル.....	37
4.2.2 モデル4の結果.....	38
4.2.3 モデル5の結果.....	40
4.2.4 モデル6の結果.....	42
4.2.5 散乱体の配置方法による検討のまとめ.....	44
5 実験.....	45
5.1 実験条件の決定.....	45
5.2 実験条件.....	46
5.3 実験結果.....	48
6 まとめ.....	49
参考文献.....	50

## 1 はじめに

### 1.1 研究背景

ソニッククリスタルとは、流体中に散乱体を周期的に配置した構造を指し、この構造を音波が通過する際に、特定の周波数帯の伝搬を著しく低下させる特性を持つことが明らかにされている[1]。この周波数帯はバンドギャップと呼ばれている。バンドギャップは、入射する音波と、散乱体により散乱された音波の間で、干渉現象や共鳴現象が生じることにより発生すると考えられている。このバンドギャップの特性は散乱体の寸法や形状、配置間隔を変えることにより変化する。

ソニッククリスタルによる遮音壁の主な特徴は、バンドギャップによる特定の周波数帯に特化した遮音効果であり、その特性を散乱体の寸法や配置間隔などを変化させることで、意図的に操作することが可能などところにある。また、それに加え、周期的に配置された柱状の物体群という構造上の特徴から得られる、遮音をしつつ、風や光の透過を許容する点や、一般的な遮音壁と比較し、構造上有利である点も、ソニッククリスタル遮音壁の特徴である。

本来、周期的に配置された散乱体によるバンドギャップの存在は、超音波や光のような高周波数帯域を扱う分野で発見され、盛んに研究がなされてきた[2,3]。騒音制御の分野では、1995年に、金属製円柱の集合体である彫刻による透過減衰の測定[1]がされて以来、可聴域範囲への適用が検討されてきた[4]。

## 1.2 研究目的

騒音制御分野でのソニッククリスタルは、道路交通騒音を遮音の対象として検討されることが多い。これは、散乱体のパラメータによりバンドギャップを変化させることが可能であることを活かし、通常遮音が難しい低周波数帯の騒音の遮音を有利に行えることが要因の一つである。しかし、バンドギャップの特徴は、光や風を許容する遮音壁という点にもあり、低周波数帯のみでなく、高周波数帯を対象とした遮音壁としても効果があると考えられる。今後、様々な騒音を対象とした遮音壁として検討を行うためには、散乱体のパラメータをもとに、発生するバンドギャップの特性を予測する必要がある。ところが、現状、これらの予測式等はなく、数値解析を用いたパラメトリックスタディを行い、要求するバンドギャップ特性を示すパラメータを探索せねばならない。そこで、本稿では、バンドギャップ特性の簡易な予測式の作成を行った。これは、数値解析による結果をもとに回帰分析を行い作成するものであり、散乱体のパラメータをもとに、バンドギャップの特性を簡易に予測することができるものである。この予測式により、今後、道路交通騒音のみならず、高周波数帯域の騒音などを対象とする遮音壁としての検討に活かされることが期待される。

## 2 数値解析

### 2.1 解析条件とモデル

本研究では、解析ソルバーとして、商用数値解析ソフト COMSOL Multiphysics[5]を用い、二次元での解析を行った。図 2.1.1 は、解析の対象とするソニッククリスタルを簡単に示した図である。Y 軸方向に剛な散乱体を周期的に配置する。また、1 列に並べたものに加えて、波の進行方向である X 軸方向に、2 列、3 列に並べて設置したソニッククリスタルについても検討を行い、本稿ではそれらをそれぞれシングル、ダブル、トリプルソニッククリスタルと呼ぶこととする。表 2.1.1 に、解析を行った散乱体の半径  $r$  [mm] と間隔  $d$  [mm] を示す。散乱体同士の中心距離  $h$  [mm] は  $h=2r+d$  で求められる。

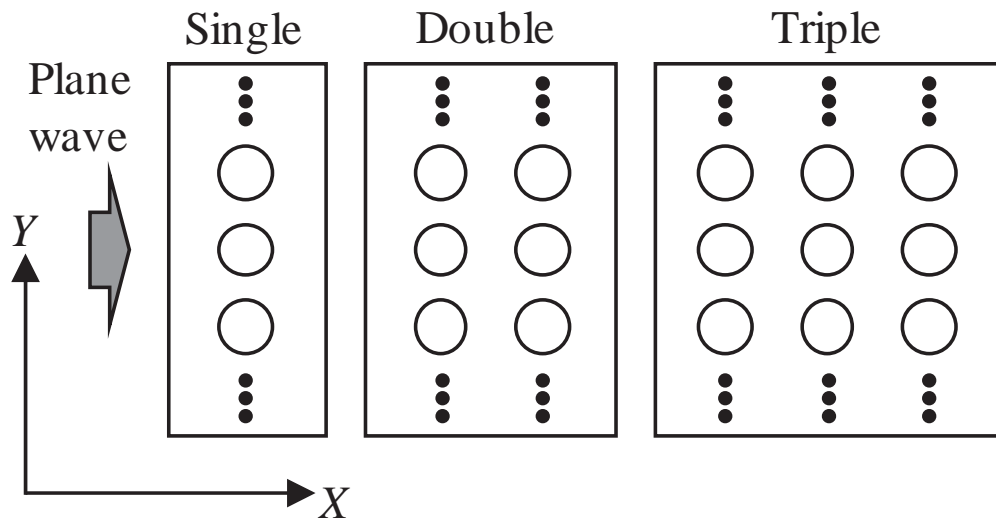


図 2.1.1 想定するソニッククリスタルの簡易なモデル

表 2.1.1 解析を行ったパラメータ

Scatterer radius $r$	20, 40, 80, 160, 320 [mm]
Scatterer spacing $d$	$1.5^0, 1.5^1, 1.5^2, \dots, 1.5^{15}$ [mm]

図 2.1.2 は、数値解析ソフトで使用したモデルである。これは図 2.1.1 のソニッククリスタルから、剛な散乱体を中心とし、高さを散乱体の中心間距離  $h$  とした最小単位で取り出したものである。モデルの上下辺には、周期境界を適用しており、 $Y$  方向への散乱体の無限周期配列を模擬した。さらに、完全吸収層(PML)を左右端にそれぞれ配置することにより、 $X$  軸方向への自由音場を模擬した。散乱体の左側には、背景圧力場と呼ばれる領域を配置し、この領域より  $X$  軸正方向に平面波の垂直入射を行う。また、線状の音圧受信点群を散乱体の左右に配置し、散乱体の前後で音圧を取得することにより、周波数ごとの透過率を計算した。ダブル、トリプルソニッククリスタルを検討する際には、追加する散乱体を  $X$  軸方向に中心間距離を  $h$  空け、右側に配置することとした。これらの計算は、周波数 1~4000 Hz の間で 1 Hz ごとに行い、メッシュの最大長は、最大周波数 4000 Hz の波長 85 mm を 10 分割することができる 8.5 mm とした。

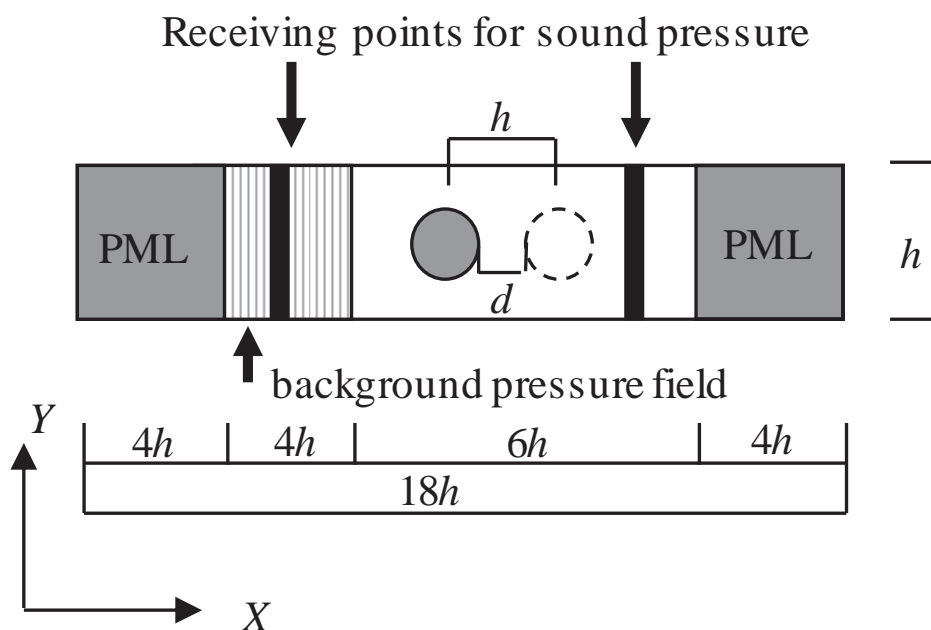


図 2.1.2 解析モデル

## 2.2 解析結果

図 2.2.1-3 は、シングル、ダブル、トリプルソニッククリスタルによる、周波数ごとの透過率のグラフである。横軸は周波数、縦軸は透過率を示しており、それぞれのグラフは散乱体同士の間隔  $15^0 \sim 1.5^{15}$  mm までのそれぞれの結果を示す。また、(a)~(e)は散乱体の半径 20 mm~320 mm までのそれぞれの図を示す。図の中心付近に見られる大きなディップがバンドギャップである。散乱体同士の間隔ごとの結果を比較すると、値が小さくなるほど低い透過率を示す。さらに、散乱体の半径ごとの結果を比較すると、半径が大きいほど、バンドギャップの周波数は低周波数側へ移動し、透過率は小さくなる。散乱体同士の間隔や半径は、透過率の増減に関与しており、密に散乱体を配置することが、遮音効果の増加に影響を与えることが考えられる。また、バンドギャップの発生する周波数が移動したことから、散乱体による共鳴現象や干渉現象に、散乱体の半径が関与していることが考えられる。また、シングル、ダブル、トリプルソニッククリスタルを比較すると、層を重ねるほど、透過率が低下している。層を重ねることで、散乱体による効果を複数回受けることが原因と考えられる。また、層を重ねると、バンドギャップと考えられる範囲内に、ダブルソニッククリスタルには一つ、トリプルソニッククリスタルには二つ、ピークが生じていた。これにより、ピークの生じる周波数帯付近では、最小透過率が引き上げられる部分が現れることがわかる。



$d = 1.5^0$   $d = 1.5^1$   $d = 1.5^2$   $d = 1.5^3$   $d = 1.5^4$   
 $d = 1.5^5$   $d = 1.5^6$   $d = 1.5^7$   $d = 1.5^8$   $d = 1.5^9$   
 $d = 1.5^{10}$   $d = 1.5^{11}$   $d = 1.5^{12}$   $d = 1.5^{13}$   $d = 1.5^{14}$   
 $d = 1.5^{15}$  [mm]

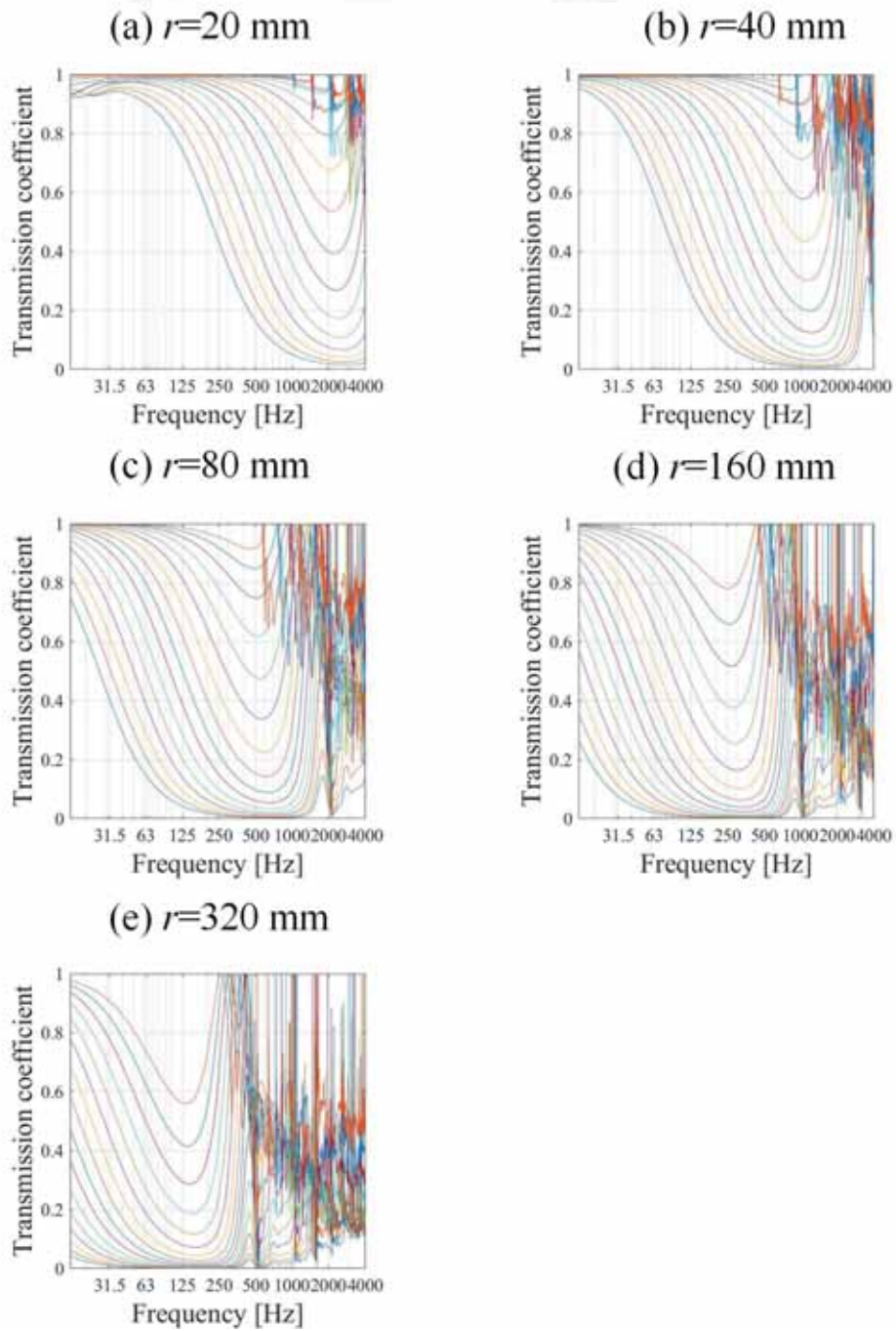


図 2.2.1 シングルソニッククリスタルの数値解析の結果

—  $d = 1.5^0$  —  $d = 1.5^1$  —  $d = 1.5^2$  —  $d = 1.5^3$  —  $d = 1.5^4$   
 —  $d = 1.5^5$  —  $d = 1.5^6$  —  $d = 1.5^7$  —  $d = 1.5^8$  —  $d = 1.5^9$   
 —  $d = 1.5^{10}$  —  $d = 1.5^{11}$  —  $d = 1.5^{12}$  —  $d = 1.5^{13}$  —  $d = 1.5^{14}$   
 —  $d = 1.5^{15}$  [mm]

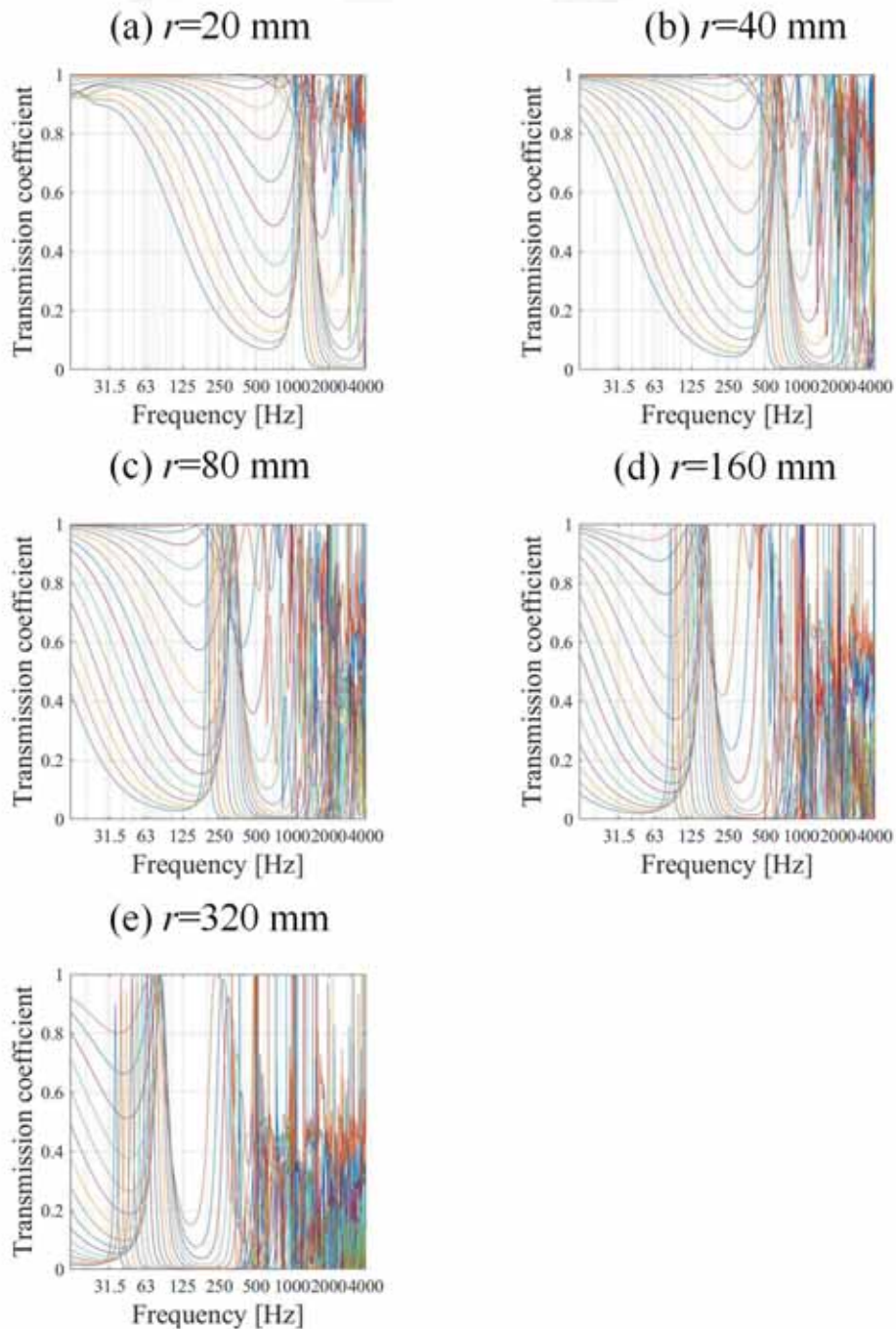
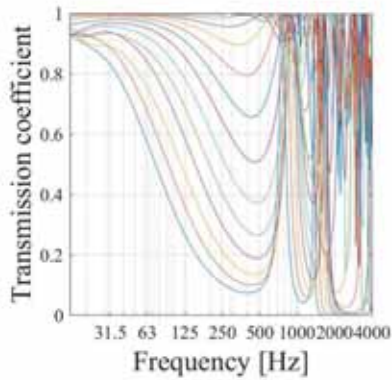


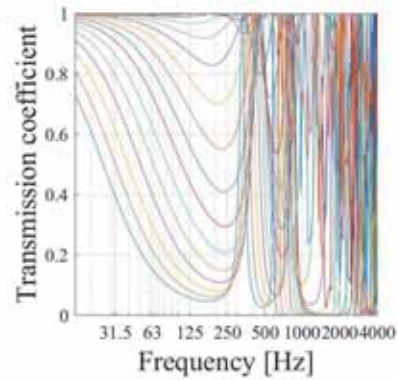
図 2.2.2 ダブルソニッククリスタルの数値解析の結果

$d = 1.5^0$   $d = 1.5^1$   $d = 1.5^2$   $d = 1.5^3$   $d = 1.5^4$   
 $d = 1.5^5$   $d = 1.5^6$   $d = 1.5^7$   $d = 1.5^8$   $d = 1.5^9$   
 $d = 1.5^{10}$   $d = 1.5^{11}$   $d = 1.5^{12}$   $d = 1.5^{13}$   $d = 1.5^{14}$   
 $d = 1.5^{15}$  [mm]

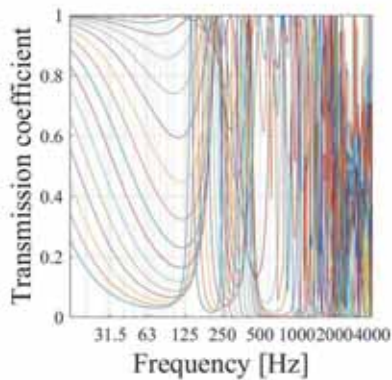
(a)  $r=20$  mm



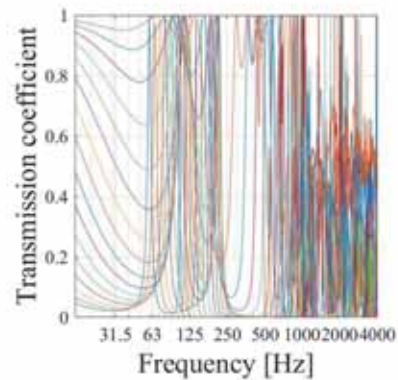
(b)  $r=40$  mm



(c)  $r=80$  mm



(d)  $r=160$  mm



(e)  $r=320$  mm

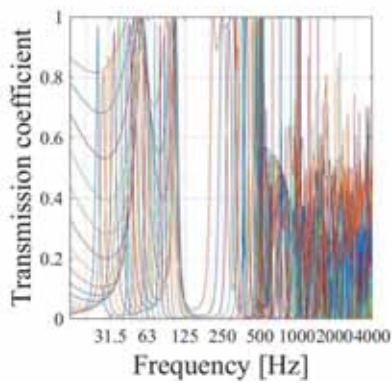


図 2.2.3 トリプルソニッククリスタルの数値解析の結果

### 2.3 データの分析

前節に示す、数値解析により得られた結果は、本稿が対象とするバンドギャップ以外のディップやピークが多く現れており、グラフ数も多く、パラメータごとのバンドギャップ特性の比較を行うことが難しい。そこで、バンドギャップの予測を行う際に重要となるバンドギャップの最小透過率とその周波数をバンドギャップ特性と定義し、それらを解析結果から抽出して検討を行う。図 2.3.1 に、半径 40 mm、散乱体同士の間隔が  $1.5^5$  mm のシングルソニッククリスタルの解析結果を示す。図の右下付近に見られる、大きなディップがバンドギャップであり、この最小透過率と周波数をバンドギャップ特性と呼ぶ。このパラメータでのバンドギャップ特性は、最小透過率  $\tau = 0.0767$ 、周波数  $f = 1281$  Hz と読み取る。

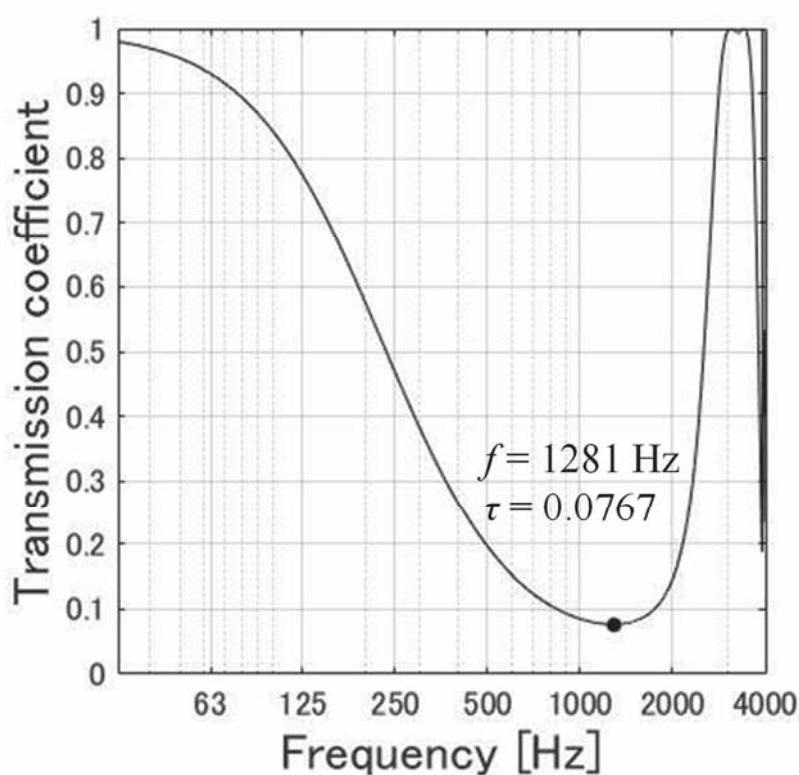


図 2.3.1 半径 40 mm、散乱体同士の間隔が  $1.5^5$  mm のシングルソニッククリスタルの解析結果

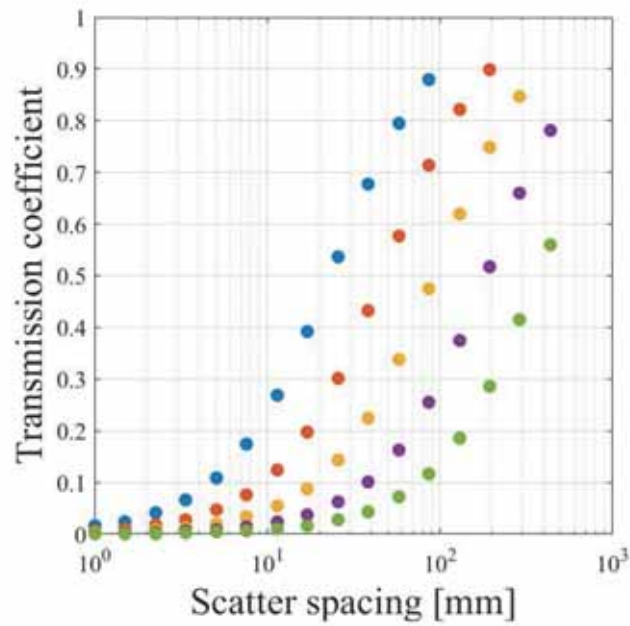
図 2.3.2-4 は、シングル、ダブル、トリプルソニッククリスタルより、バンドギャップ特性を取り出し、横軸を散乱体同士の間隔  $d$ 、縦軸を(a)では透過率  $\tau$ 、(b)では周波数  $f$  のグラフに表したものである。バンドギャップの透過率を示す各図の(a)のグラフは、散乱体同士の間隔が狭いほど、透過率は 0 に近づき、間隔が広がるほど、透過率が 1 に近づくような形状をしている。これは、散乱体の半径やダブル、トリプルソニッククリスタルにおいても同様である。また、バンドギャップの周波数を示す各図の(b)は、(a)のグラフを左右反転させたような形状をしており、散乱体同士の間隔を大きくするほど周波数は 0 に近づき、間隔を小さ

くするほどそれぞれの条件での最大値に近づく傾向を示す。これらのグラフより、バンドギャップの最小透過率と周波数のグラフはそれぞれ同様の形状、傾向を示しており、同様の傾向を持つ数式を用いることで、回帰近似が可能であると考えられる。



- $r = 20$  mm    ●  $r = 40$  mm    ●  $r = 80$  mm
- $r = 160$  mm    ●  $r = 320$  mm

(a) Transmission coefficient



(b) Frequency

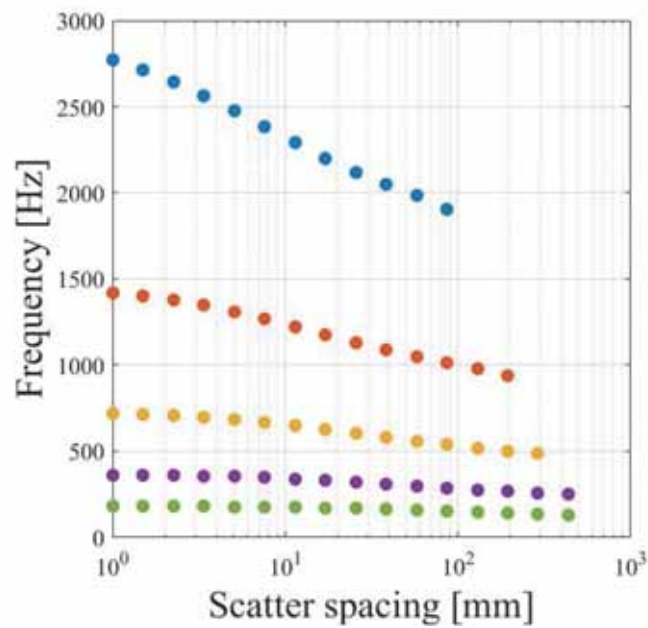
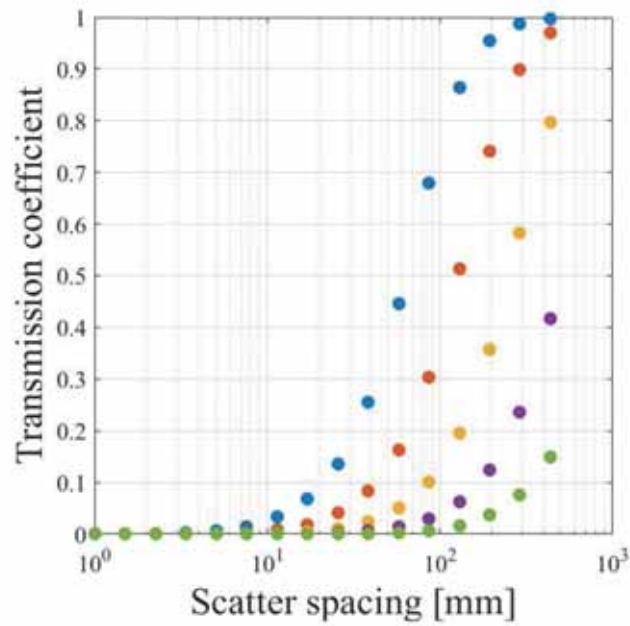


図 2.3.2 シングルソニッククリスタルのバンドギャップ特性

- $r = 20$  mm   ●  $r = 40$  mm   ●  $r = 80$  mm
- $r = 160$  mm   ●  $r = 320$  mm

(a) Transmission coefficient



(b) Frequency

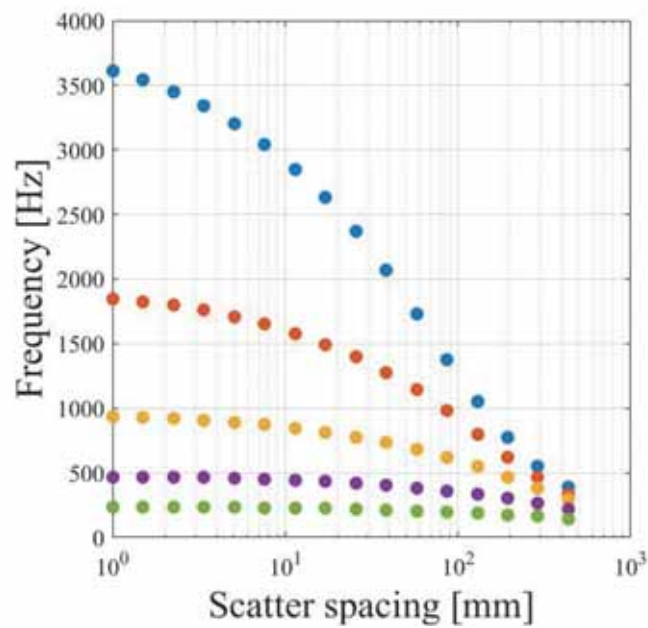
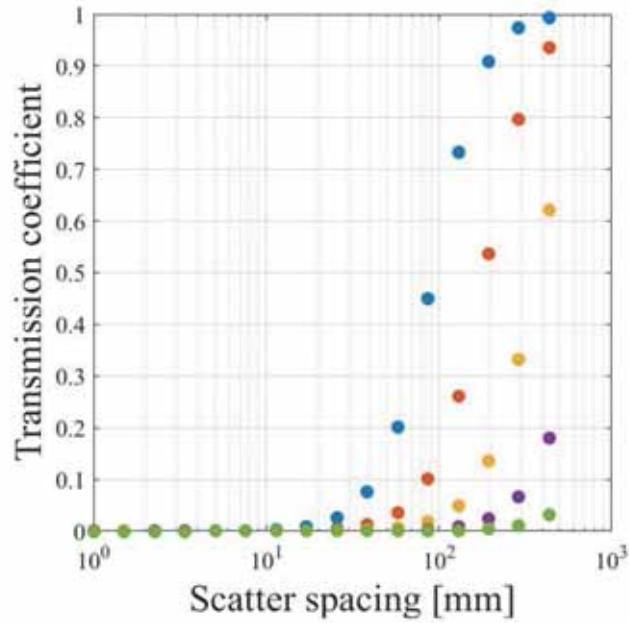


図 2.3.3 ダブルソニッククリスタルのバンドギャップ特性

- $r = 20$  mm   ●  $r = 40$  mm   ●  $r = 80$  mm
- $r = 160$  mm   ●  $r = 320$  mm

(a) Transmission coefficient



(b) Frequency

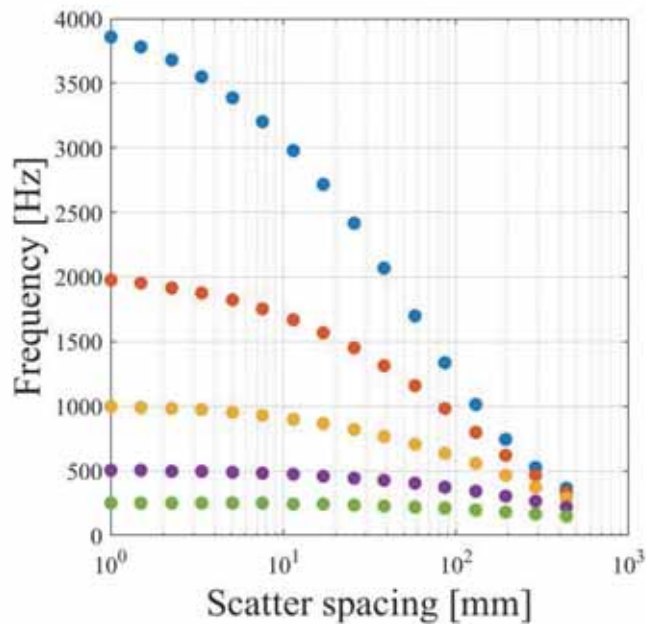


図 2.3.4 トリプルソニッククリスタルのバンドギャップ特性



### 3 予測式の作成

#### 3.1 回帰分析の方法

##### 3.1.1 回帰分析の関数の決定

第2章の結果より、散乱体同士の配置間隔が広がるほど、バンドギャップの最小透過率は1に近づく。また、配置間隔が狭まるほど0に近づく特性が確認できた。この特性は、散乱体の半径を変えた場合も同様であることから、これらの関係について回帰近似を行うことによって、簡易なバンドギャップ特性の予測式の作成を目指した。しかし、散乱体のパラメータとバンドギャップ特性間の関係について、一般的な回帰分析で用いられる二次関数や指数関数、対数関数などの近似曲線を用いた場合には、精度の高い回帰近似を行うことはできなかった。そこで、本研究では、シグモイド関数と呼ばれる関数を近似曲線とし、回帰近似を行った。図3.1.1は、 $y = \frac{1}{1+e^{-x}}$ で表される、シグモイド関数のグラフである。0と1を漸近線に持つ単調増加関数であり、これが散乱体の間隔とバンドギャップ特性間の関係と類似しており、高い精度での回帰近似を行うことができた。

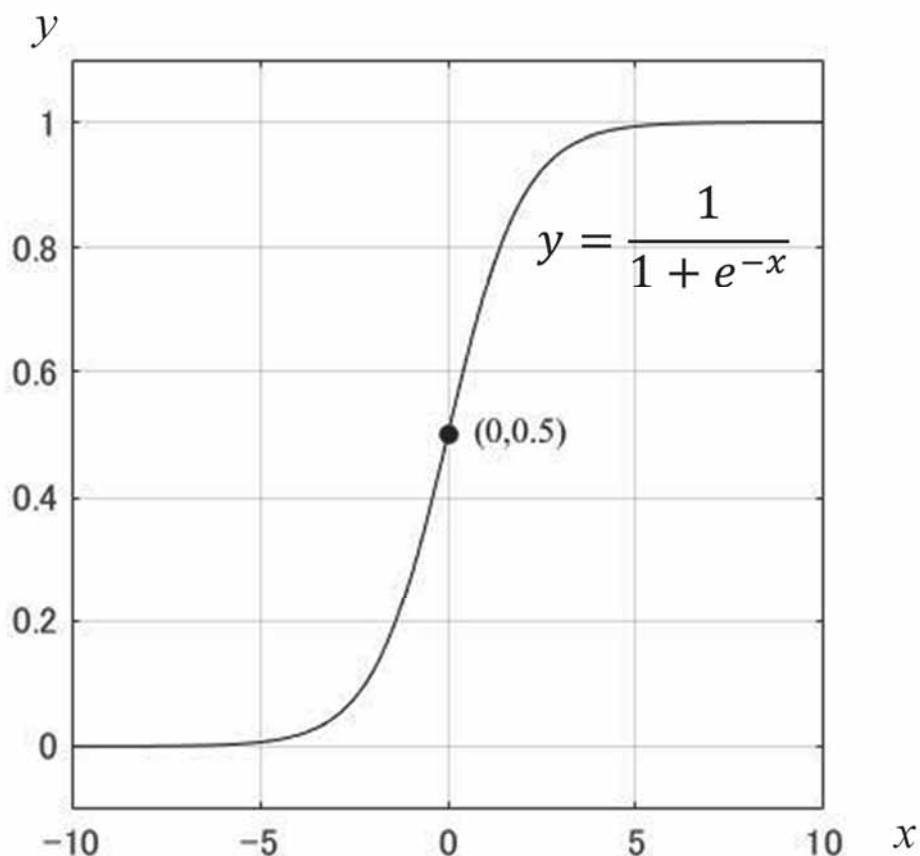


図 3.1.1 シグモイド関数

### 3.1.2 回帰分析の方法

前章 3 節の方法でパラメータごとに取得したバンドギャップ特性をもとに、予測式の作成を行う。最初に、半径ごとに散乱体の配置間隔に対する透過率の関係について、シグモイド関数を元にした式  $\tau = \frac{1}{1+e^{-a \log_e(d-b)}}$  を用いて、最小二乗法による回帰近似を行った。 $\tau$  は、バンドギャップの最小透過率であり、 $d$  は散乱体同士の間隔を表す。また、 $a, b$  は係数であり、回帰近似によって決定される。次に、回帰近似により得られた係数と散乱体同士の間隔を用いて、一次関数  $a = c_1 r + d_1, b = c_2 r + d_2$  を近似式とし、回帰近似を行うことでバンドギャップの最小透過率とその周波数に関する予測式を得た。また、バンドギャップの周波数についても透過率と同様に回帰近似を行った。近似式は、シグモイド関数を用いた式  $f = \frac{a}{1+e^{-b \log_e(a-c)}}$  を用いて行い、 $f$  [Hz] は周波数、 $d$  [mm] は散乱体の間隔を示す。 $a, b, c$  は係数であり、回帰近似により決定される。周波数は、漸近線を 1, 0 ではなく、0 と数千を持つため、分子に係数  $a$  を設けることで、シグモイド関数を用いることができた。

### 3.1.3 作成された予測式

回帰近似によって得られた予測式を以下に示す。

$$\tau = \frac{1}{1 + e^{-(Ar+B)\left\{\log_{\frac{d}{r}} \frac{d}{a} - D\right\}}}, \quad (1)$$

$$f = \frac{Er^F}{1 + e^{Gr^H\left\{\log_{\frac{d}{r}} \frac{d}{J} - I\right\}}}, \quad (2)$$

$\tau$  は最小透過率、 $f$  [Hz] はその発生周波数を示す。 $A-J$  は係数であり、表 3.1.1 にその値を示す。散乱体の重複数に応じて、それぞれの値を代入し計算を行う。

表 3.1.1： バンドギャップの最小透過率と周波数の予測式の係数

Transmission coefficient $\tau$	$A$	$B$	$C$	$D$		
Single	-0.000155	1.4356171	1.0060435	0.1111267		
Double	-0.001462	2.3182089	1.0400487	0.9801194		
Triple	-0.002667	6.8641838	0.4474176	0.6163601		
Frequency $f$	$E$	$F$	$G$	$H$	$I$	$J$
Single	111890.45	-1.111419	0.0673323	0.3464926	-1.315337	-0.301644
Double	70188.386	-0.985414	1.197922	-0.085267	-1.018386	-0.793459
Triple	76198.159	-0.987858	1.1174045	-0.065592	-1.00857	-0.665961

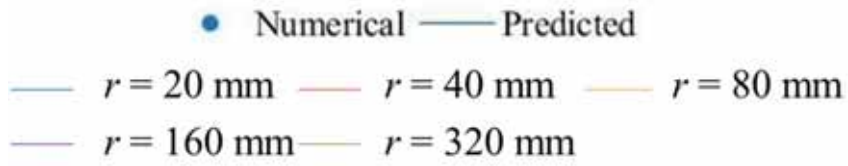
### 3.1.4 予測式と解析解の比較

図 3.1.2-4 は、シングル、ダブル、トリプルソニッククリスタルについて、予測式と数値解析解を比較したものである。(a)はバンドギャップの最小透過率のグラフを示し、(b)はその周波数のグラフを示す。横軸が散乱体同士の間隔を示し、縦軸はバンドギャップの最小透過率と周波数を示す。数値解析の結果より求めたバンドギャップ特性を点で表し、予測式を線で表す。条件により、解析解と予測式にずれがある部分はあるが、おおむね一致している。また、表 3.1.2 に数値解析解と予測式の決定係数を示す。どの条件においても、0.99 を超えており、高い精度で回帰近似が行われたと言える。

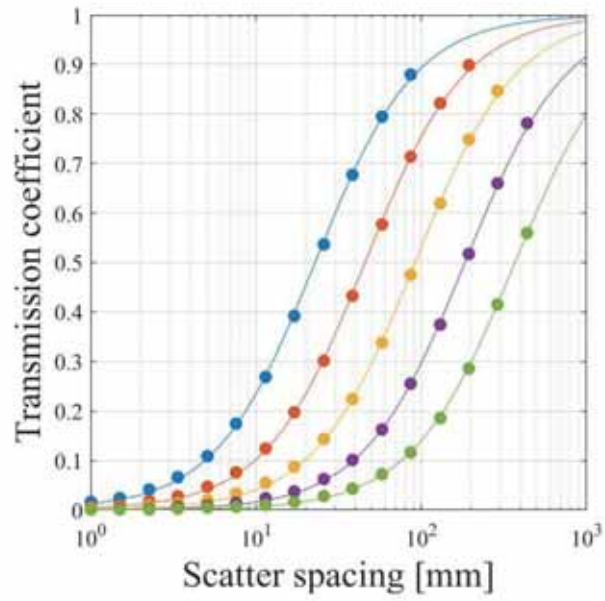
表 3.1.2 数値解析解と予測式の決定係数

	Single	Double	Triple
Transmission coefficient	0.998	0.992	0.998
Frequency	0.995	0.995	0.997

シングル、ダブル、トリプルソニッククリスタルの透過率のグラフである、図 3.1.2-4 の(a)を比較すると、層を重ねるほど、散乱体の間隔である横軸の右方向へグラフが全体的に移動する様子が確認できた。ソニッククリスタルを重複させると、通過する音波が散乱体から受ける影響も増加することが予想され、広い間隔を持つソニッククリスタルでも透過しづらくなったと考えられる。半径が増加するほど、低い透過率を示すことも、同様の影響であると考えられる。また、周波数を示す図 3.1.2-4 の(b)を比較すると、層を重ねるほど、図左側の最高周波数が上昇し、図右側の最低周波数が低下している。散乱体の半径とともに、重複した散乱体の配置もバンドギャップの発生周波数帯に影響を与えることがわかる。



(a) Transmission coefficient



(b) Frequency

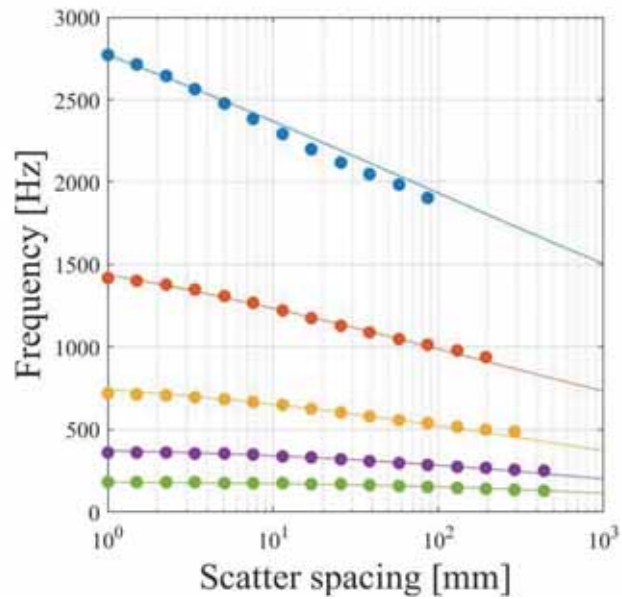
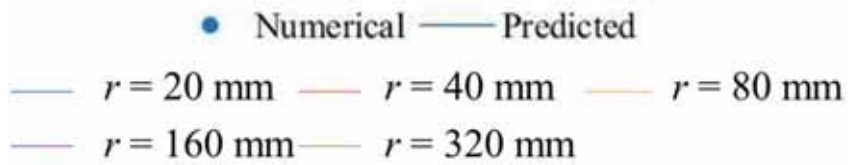
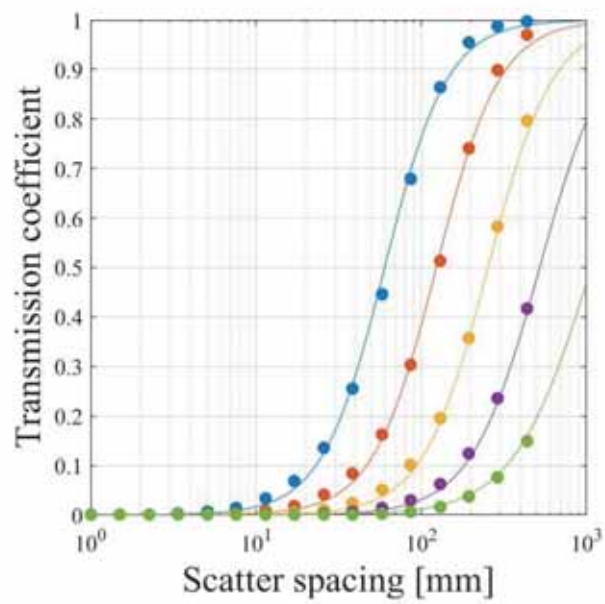


図 3.1.2 シングルソニッククリスタルの数値解析解と予測式の比較



(a) Transmission coefficient



(b) Frequency

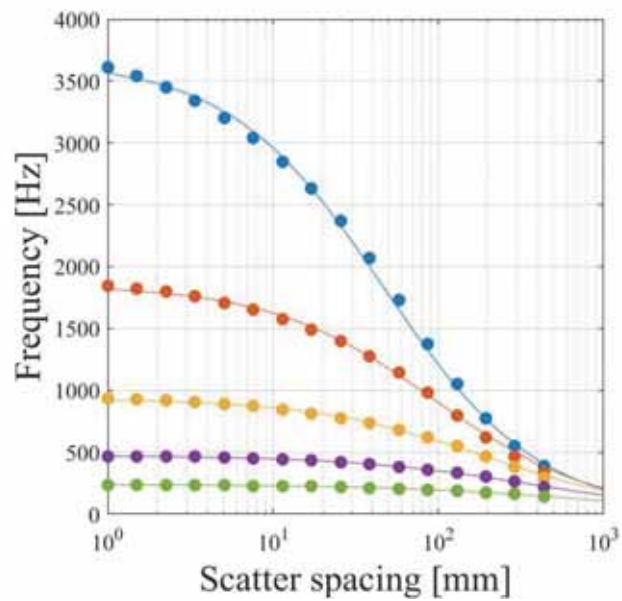
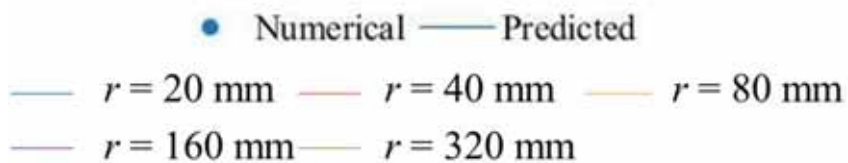
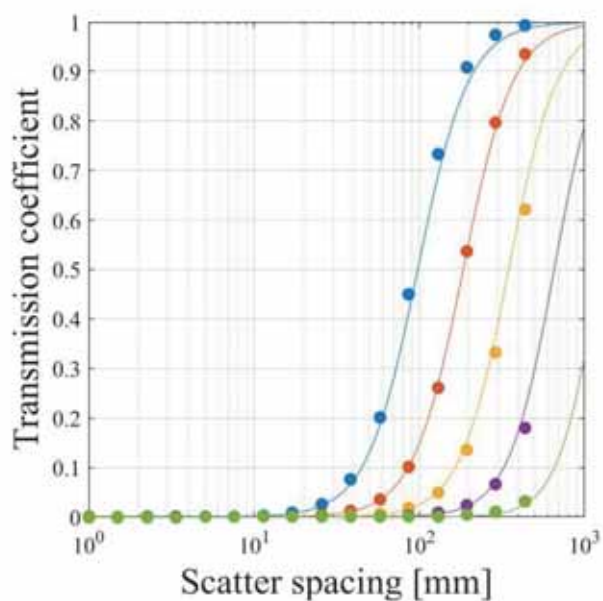


図 3.1.3 ダブルソニッククリスタルの数値解析解と予測式の比較



(a) Transmission coefficient



(b) Frequency

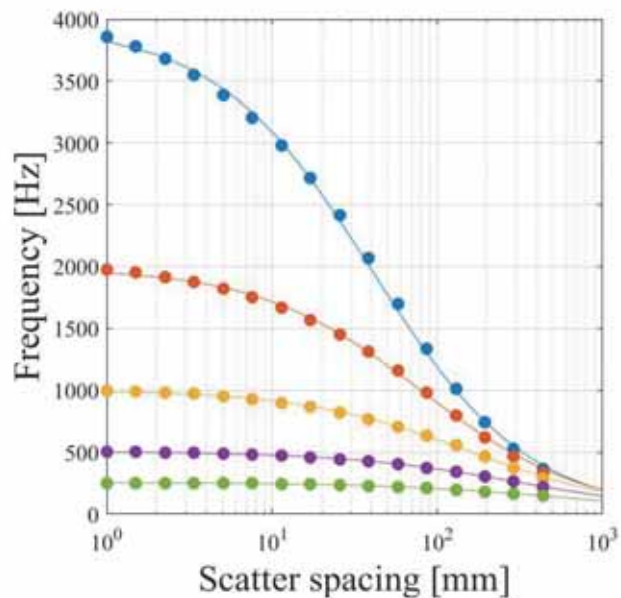


図 3.1.4 トリプルソニッククリスタルの数値解析解と予測式の比較

## 3.2 乱入斜条件との比較

### 3.2.1 乱入斜条件での解析

本稿では、平面波垂直入射条件での解析を主に使用し、予測式の作成や効果の検討を行うが、遮音壁として使用するには、音波は様々な角度からの侵入が予測される。そこで、一部の条件について、乱入斜条件での解析結果をもとに、効果の比較と予測式の作成を行い、差を確認した。乱入斜条件での解析結果は、いくつかの角度からの平面波の斜め入射条件での結果をもとに、Paris の式と呼ばれる  $\tau = \sum \tau(\theta) \cos \theta d\theta$  を用いて計算することにより求めた。 $\tau$  は透過率であり、 $\theta$  は平面波の入射角である。入射角  $\theta$  は、5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85° の 9 パターンとする。図 3.2.1 に、垂直入射条件での結果と、乱入斜条件での結果の一例を示す。半径 40 mm、散乱体同士の間隔が 1.5<sup>5</sup> mm のシングルソニッククリスタルの解析結果であり、横軸が周波数、縦軸が透過率である。周波数が数十ヘルツの低周波数帯や、3000 Hz 以降の高周波数帯では大きくずれる部分もあるが、250 Hz あたりから 2000 Hz ごろにあるバンドギャップに関してはおおむね近い値を示しており、垂直入射での結果が乱入斜条件での結果より少し高い透過率を示している。これは、入射角が大きくなるほど、散乱体の影響を受けず通過する音波が減少することに影響するものであると考えられる。また、異なる散乱体のパラメータによる解析結果も同様の傾向を示しており、特にバンドギャップの最小透過率とその周波数は近い値をとることから、バンドギャップ特性の予測には垂直入射の結果を用いることも可能であると考えられる。

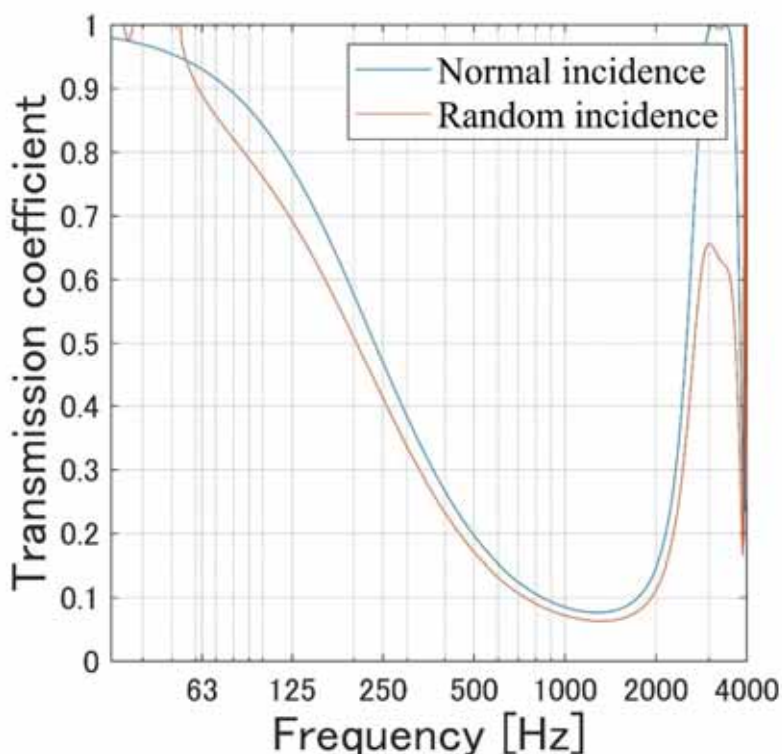


図 3.2.1 径 40 mm、散乱体同士の間隔が 1.5<sup>5</sup> mm のシングルソニッククリスタルの解析結果



この方法で得られた乱入斜条件での数値解析結果をもとに第 1 節と同様の方法で予測式を作成したところ、式(3),(4)が得られた。表 3.2.1 に、係数 A-J の値を示す。図 3.2.2 に、乱入斜条件でのシングル、ダブル、トリプルソニッククリスタルの解析結果と予測式の比較を示す。(a)は横軸が散乱体同士の間隔、縦軸がバンドギャップの最小透過率を示し、(b)は横軸が散乱体同士の間隔、縦軸がバンドギャップの周波数である。ほとんどの条件でよい一致を示すが、半径 20 mm で散乱体同士の間隔を 20 mm あたりとした以降では、予測式の傾向とずれが生じ始めている。それぞれの数値解析解と予測式の決定係数を表 3.2.2 に示す。垂直入射の際と比較して、少し低い値ではあるが、どちらも 0.99 を超えており、ほとんどの条件では予測式として使用が可能である。また、図 3.1.2 の垂直入射の結果と比較し、透過率は少し低い値をとるが、ほとんど同じ値を示す。これより、垂直入射の結果を用いた予測式で、乱入斜条件での結果もある程度は予測することが可能であると考えられるため、次章の様々な条件への予測式の適用には、垂直入射の結果を用いることとする。

$$\tau = \frac{1}{1 + e^{-(Ar+B)\left\{\log_{r^G} \frac{d}{G} - D\right\}}}, \quad (3)$$

$$f = \frac{Er^F}{1 + e^{Gr^H\left\{\log_{r^I} \frac{d}{I} - J\right\}}}, \quad (4)$$

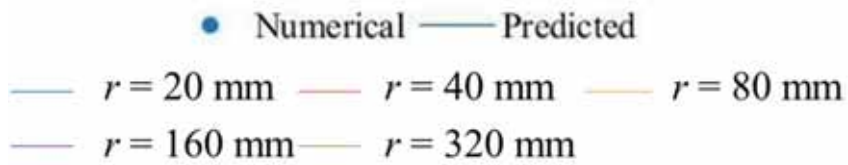
表 3.2.1 乱入斜条件での予測式に用いる係数

Transmission coefficient $\tau$	A	B	C	D		
Single	0.000486	1.168069	0.905384	0.88021		
Frequency $f$	E	F	G	H	I	J
Single	216556.3	-1.111419	0.0673323	0.3464926	-1.315337	-0.301644

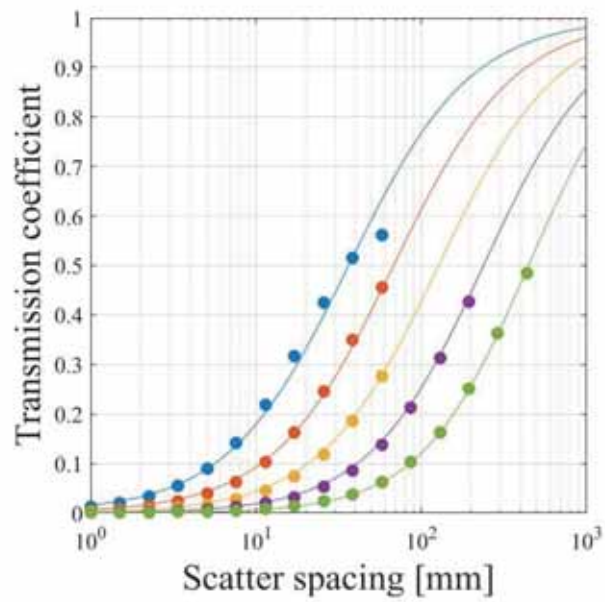
表 3.2.2 乱入斜条件での数値解析解と予測式の比較

Transmission coefficient	0.995
Frequency	0.994





(a) Transmission coefficient



(b) Frequency

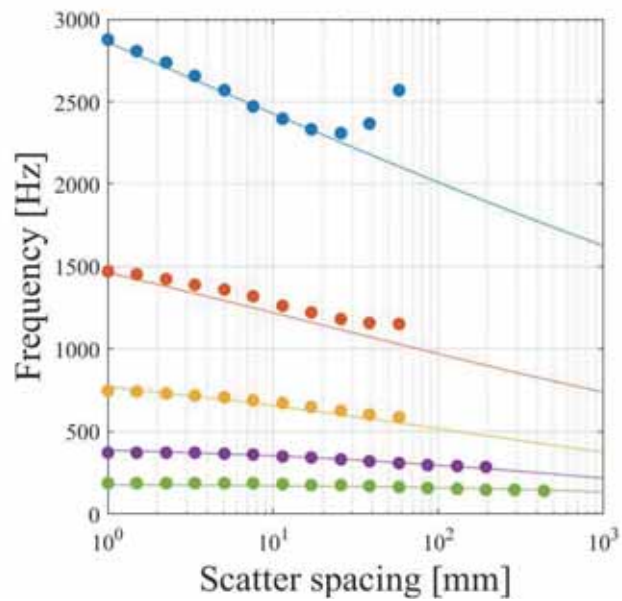


図 3.2.2 乱入斜条件でのシングルソニッククリスタルの数値解析解と予測式の比較

## 4 様々なパラメータの予測式の作成

### 4.1 散乱体の断面形状による検討

#### 4.1.1 検討するモデル

本章では、前章で示された予測式の作成方法を用いて、散乱体の断面を変えた条件での数値解析結果をもとに予測式を作成した。予測式の精度の確認とともに、パラメータの変化によるバンドギャップ特性への影響を観察し、評価する。図 4.1.1 に、本節で扱う散乱体の断面図を示す。モデル 1 は 1 辺  $2r$  [mm] の正方形断面であり、モデル 2 はモデル 1 の正方形を  $45^\circ$  傾け、斜辺を  $2r$  [mm] に縮小したものである。モデル 3 は 1 辺  $2r$  [mm] の正三角形である。

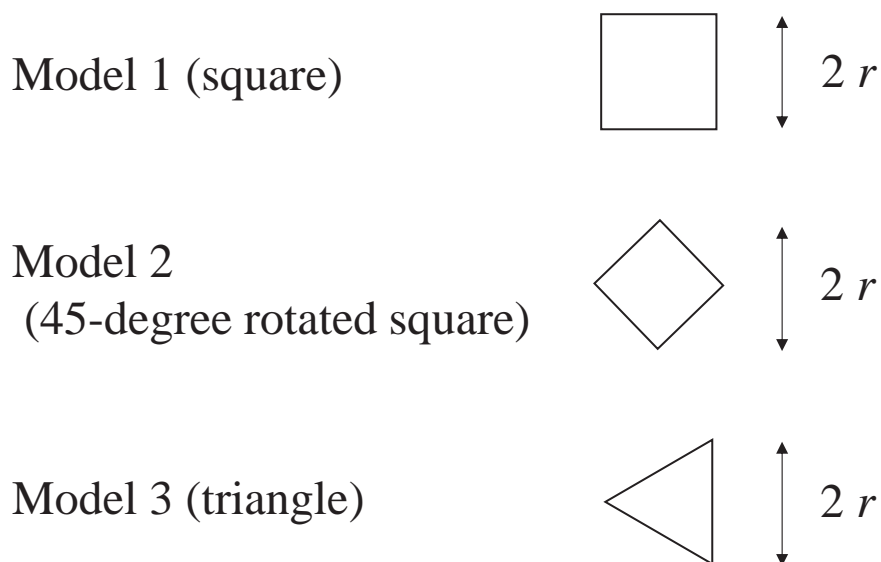


図 4.1.1 散乱体の断面図のモデル

#### 4.1.2 モデル 1 の結果

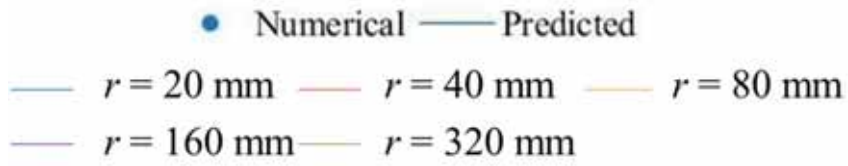
図 4.1.2-4 は、正方形断面を持つモデル 1 の散乱体を用いたシングル、ダブル、トリプルソニッククリスタルの数値解析解と予測式を比較したものである。(a)にはバンドギャップの最小透過率を縦軸に表し、横軸に散乱体同士の間隔を表すグラフを示し、(b)にはバンドギャップの周波数を縦軸に表し、横軸に散乱体同士の間隔を表すグラフを示す。点は数値解析結果を示し、線は予測式を示す。また、各グラフは下から、半径 20, 40, 80, 160, 320 mm の結果を示している。また、表 4.1.1 は予測式の係数を示す。どの条件においても、数値解析解と予測式は近い値をとっており、第 3 章の方法を用いて数値解析解より予測式の作成ができた。散乱体同士の間隔と散乱体の大きさの関係は円柱のソニッククリスタルと同様である。しかし、図 4.1.3-4 の(b)に示す周波数のグラフを図 3.1.3-4 の(b)に示す円柱のソニッククリスタルのグラフと比較すると、全体的に低い周波数となっている。これは、バンドギャップと考える範囲内に現れたピークにより、バンドギャップが分割されたことが影響と考えられる。

$$\tau = \frac{1}{1 + e^{-(Ar+B)\left\{\log_{\frac{d}{r}}\frac{d}{g}-D\right\}}}, \quad (5)$$

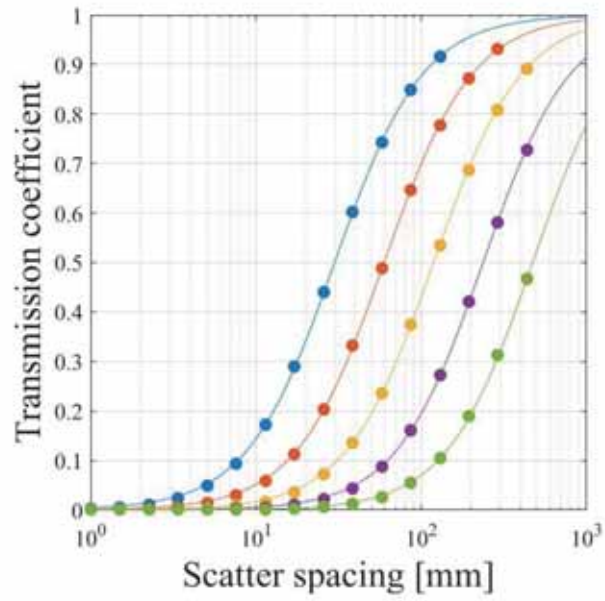
$$f = \frac{Er^F}{1 + e^{Gr^H\left\{\log_{\frac{d}{r}}\frac{d}{l}-J\right\}}}, \quad (6)$$

表 4.1.1： モデル 1 によるバンドギャップの最小透過率と周波数の予測式の係数

Transmission coefficient $\tau$	$A$	$B$	$C$	$D$		
Single	0.000113	1.6246587	0.9960404	0.4142619		
Double	-0.0003160	1.9561382	1.00464	-1107958		
Triple	-0.0002978	1.9622016	1.0041701	-0.1476611		
Frequency $f$	$E$	$F$	$G$	$H$	$I$	$J$
Single	114965.18	-1.1540098	0.0259575	0.4238951	2.0313275	-2.950483
Double	15066.610	-0.9974359	1.1460712	-0.0334142	1.0347507	1.1656047
Triple	9777.8508	-0.9923775	1.3804062	-0.0819693	1.0795151	0.935986



(a) Transmission coefficient



(b) Frequency

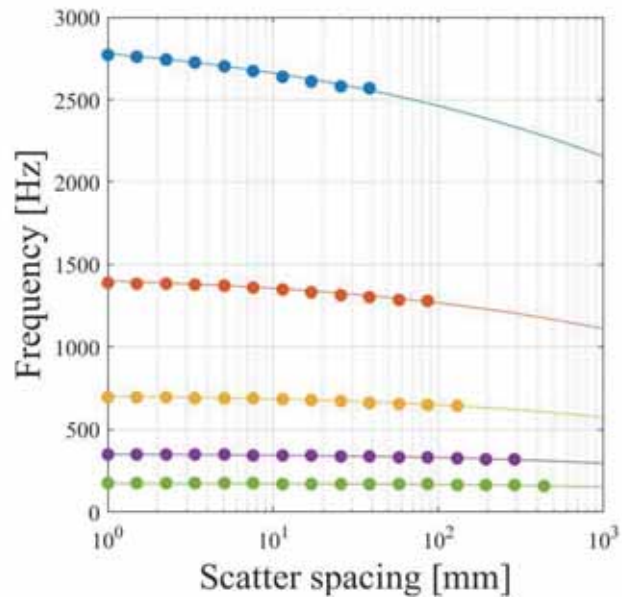
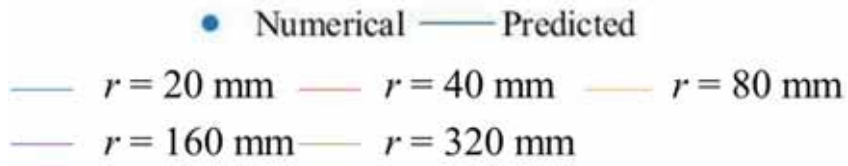
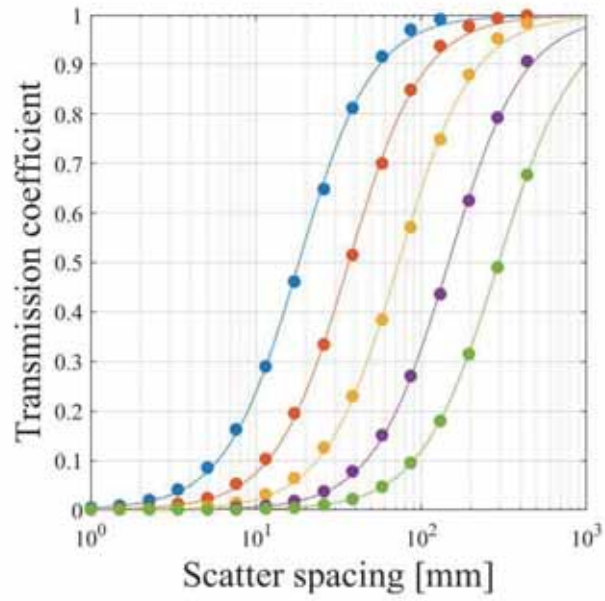


図 4.1.2 モデル 1 の散乱体を持つシングルソニッククリスタルの数値解析解と予測式



(a) Transmission coefficient



(b) Frequency

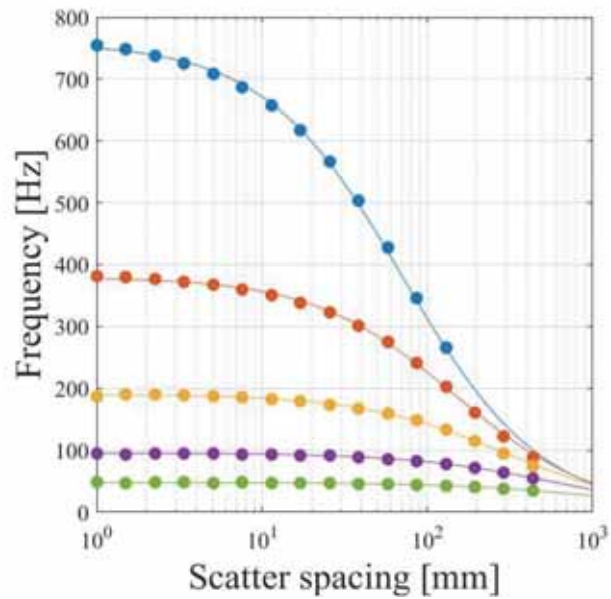
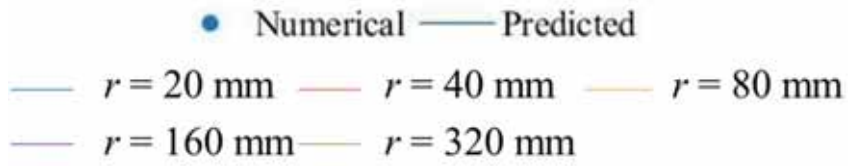
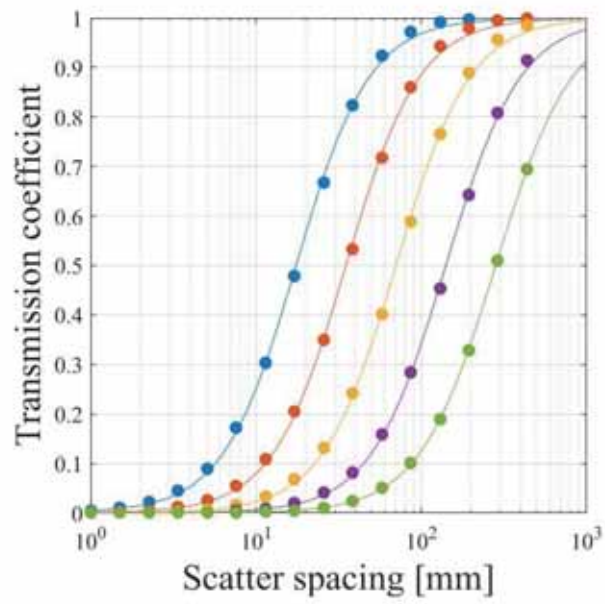


図 4.1.3 モデル 1 の散乱体を持つダブルソニッククリスタルの数値解析解と予測式



(a) Transmission coefficient



(b) Frequency

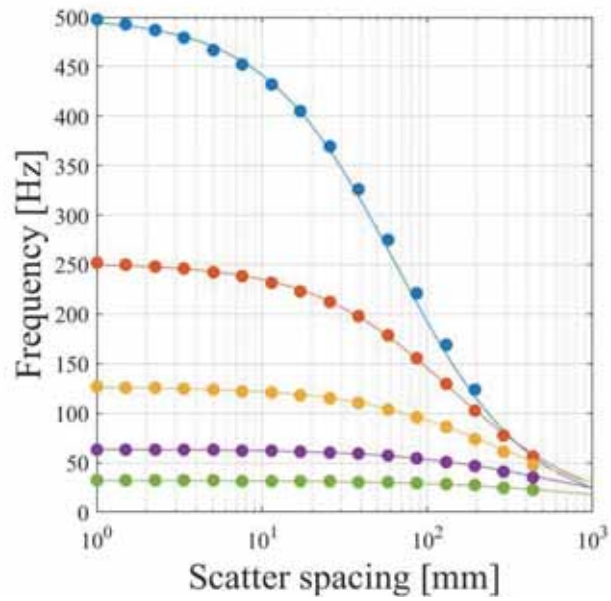


図 4.1.4 モデル 1 の散乱体を持つトリプルソニッククリスタルの数値解析解と予測式

#### 4.1.3 モデル 2 の結果

図 4.1.5-7 は、モデル 1 を 45° 回転したモデル 2 の散乱体を用いたシングル、ダブル、トリプルソニッククリスタルの数値解析解と予測式を比較したものである。また、表 4.1.2 は、予測式の係数を示す。一部の条件ではずれが生じたが、数値解析解と予測式は近い値をとっており、第 3 章の方法を用いて数値解析解より予測式の作成ができた。バンドギャップの最小透過率やその周波数については、円柱のソニッククリスタルと大きく変わらず、全体的な性能は同等のものであると考えられる。また、モデル 1 の結果と比較を行うと、ダブル、トリプルソニッククリスタルでの、周波数が大きく異なっている。これは、バンドギャップ中に生じるピークの周波数がモデル 1 の場合と変化したことが原因と考えられる。このことから、角柱を散乱体として用いる場合、音波の入射角により、バンドギャップの周波数が大きく異なることが予想される。また、透過率もモデル 1 と比較し、全体的に低い値をとっており、より高い効果を発揮するのはモデル 2 のソニッククリスタルであると考えられる。これは、音波の入射方向に対し、角度を持った平面を持つモデル 2 から反射された音波が、散乱体をすり抜ける音波と干渉などの現象を生じることで、透過を妨げることが原因であると考えられる。モデル 1 とモデル 2 の比較より、角柱を散乱体として使用する場合、角度を变化することによるバンドギャップ特性への影響が見られた。

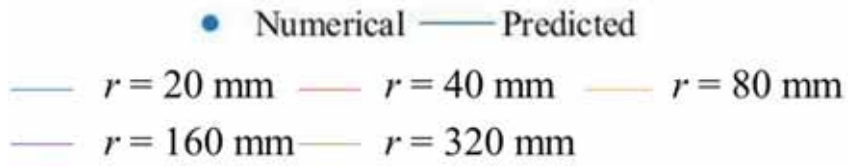
$$\tau = \frac{1}{1 + e^{-(Ar+B)\left\{\log_{r^2} \frac{d}{g} - D\right\}}}, \quad (7)$$

$$f = \frac{Er^F}{1 + e^{Gr^H\left\{\log_{r^2} \frac{d}{g} - J\right\}}}, \quad (8)$$

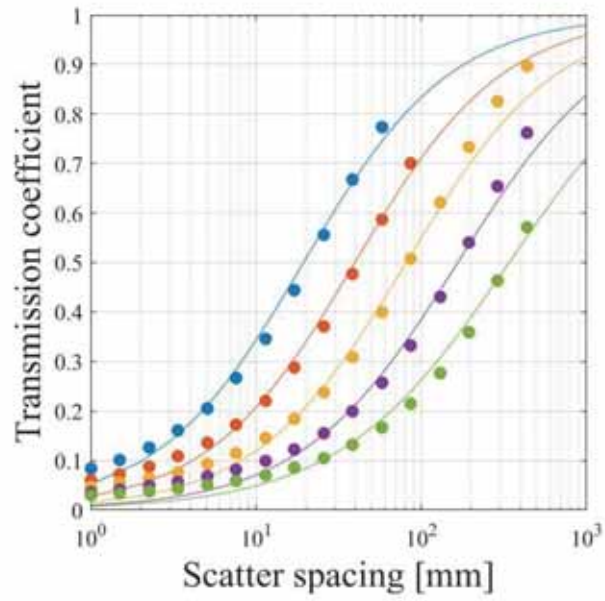
表 4.1.2：モデル 2 によるバンドギャップの最小透過率と周波数の予測式の係数

Transmission coefficient $\tau$	$A$	$B$	$C$	$D$		
Single	-0.0004666	0.990255	1.0348091	-0.1364718		
Double	-0.0018839	2.1666647	1.0759340	0.8787438		
Triple	-0.0016063	2.843641	1.0531583	1.3862897		
Frequency $f$	$E$	$F$	$G$	$H$	$I$	$J$
Single	48344.471	-1.0114463	0.2798464	0.1634849	0.5966553	5.3418335
Double	53713.498	-1.0060022	0.8346459	0.0591450	0.9610863	1.4795965
Triple	55408.410	-1.0071234	0.8151962	0.0655808	0.9575040	1.3879750





(a) Transmission coefficient



(b) Frequency

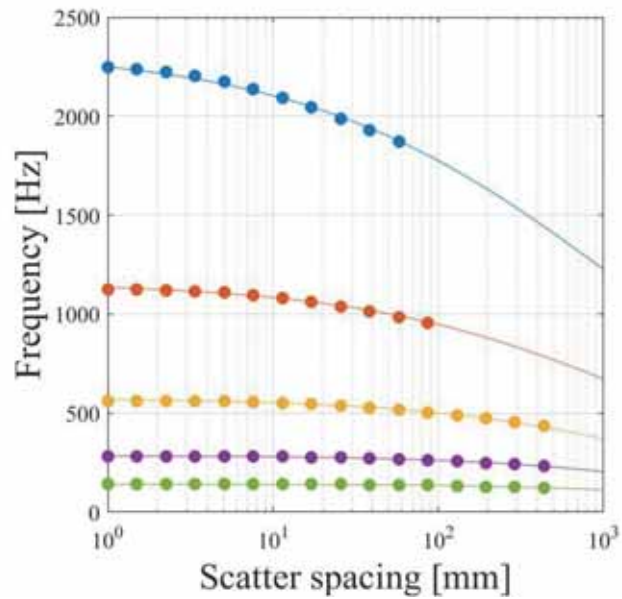
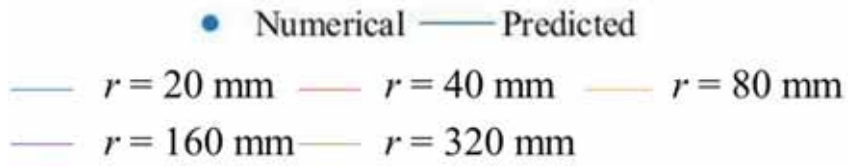
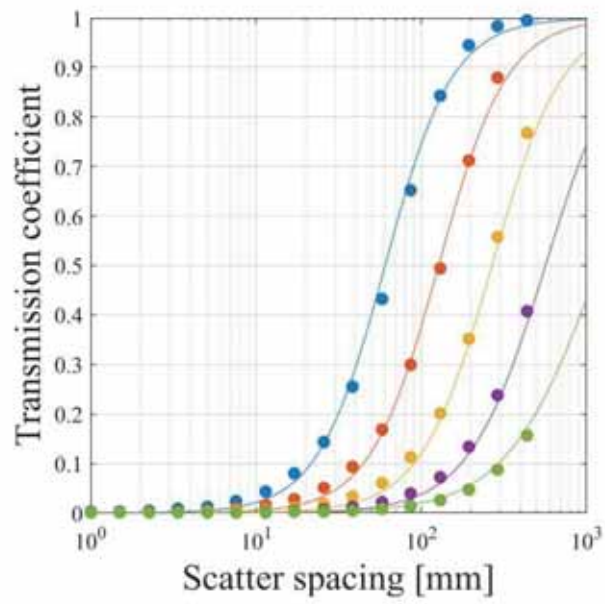


図 4.1.5 モデル 2 の散乱体を持つシングルソニッククリスタルの数値解析解と予測式





(a) Transmission coefficient



(b) Frequency

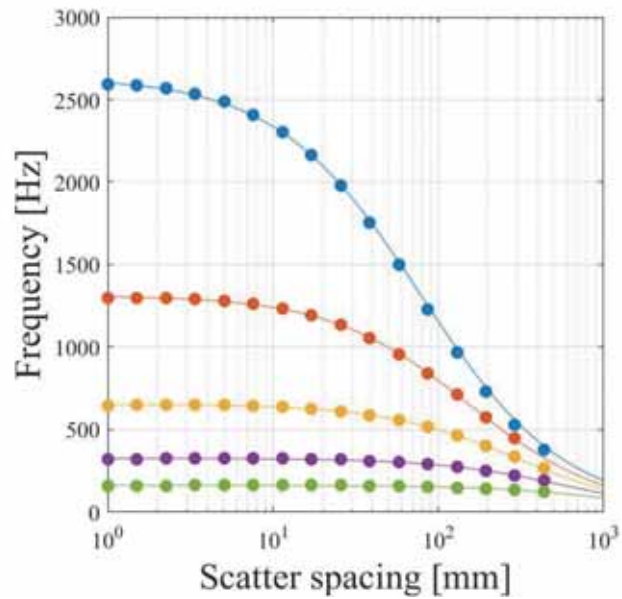
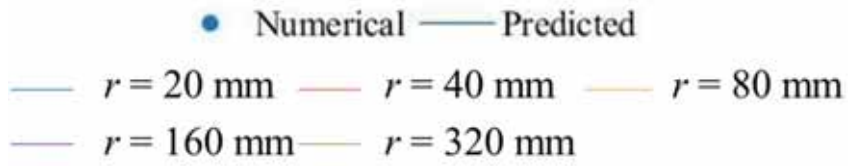
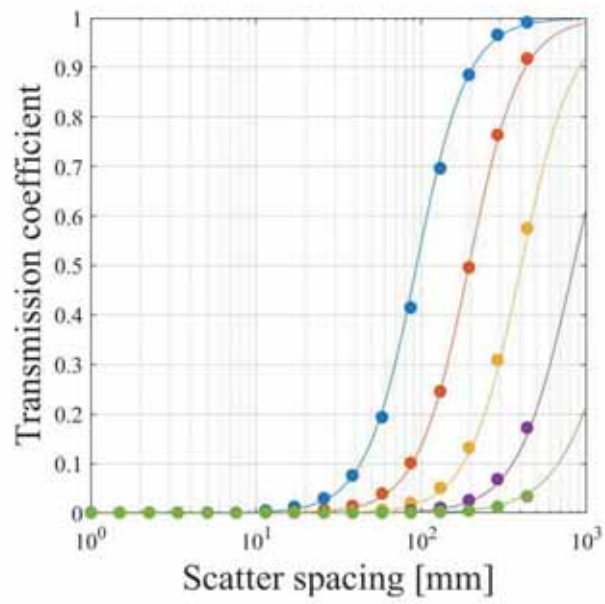


図 4.1.6 モデル 2 の散乱体を持つダブルソニッククリスタルの数値解析解と予測式



(a) Transmission coefficient



(b) Frequency

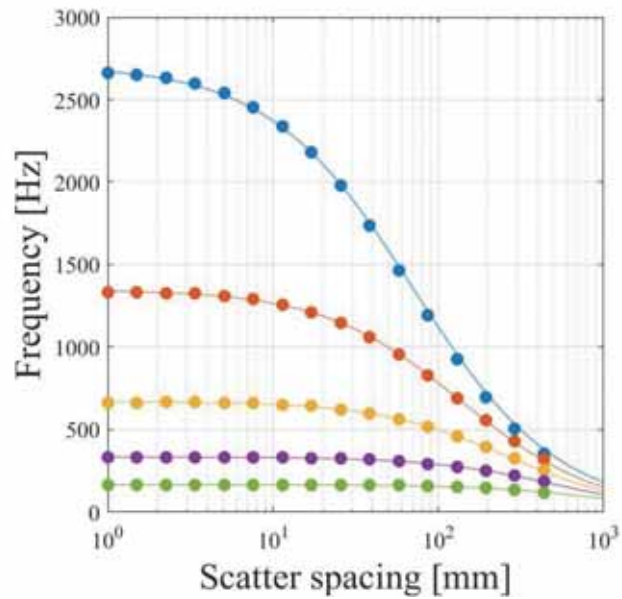


図 4.1.7 モデル 2 の散乱体を持つトリプルソニッククリスタルの数値解析解と予測式

#### 4.1.4 モデル 3 の結果

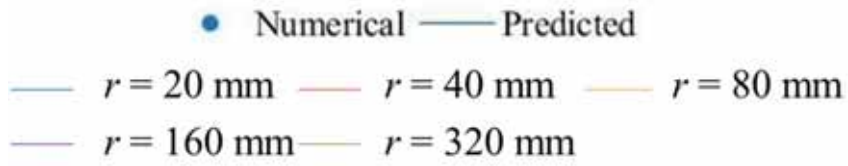
図 4.1.8-10 は、正三角形断面を持つモデル 3 の散乱体を用いたシングル、ダブル、トリプルソニッククリスタルの数値解析解と予測式を比較したものである。表 4.1.3 は、予測式の係数を示す。このモデルも、一部の条件ではずれが生じたが、数値解析解と予測式は近い値をとっており、第 3 章の方法を用いて数値解析解より予測式の作成ができた。しかし、モデル 1 と同様に、図 4.1.9-10 の(b)に示すダブル、トリプルソニッククリスタルの周波数は低い値を示し、透過率も全体的に低い値を示している。これも、バンドギャップ内に生じるピークが原因と考えられる。

$$\tau = \frac{1}{1 + e^{-(Ar+B)\left\{\log_{r^G} \frac{d}{G} - D\right\}}}, \quad (9)$$

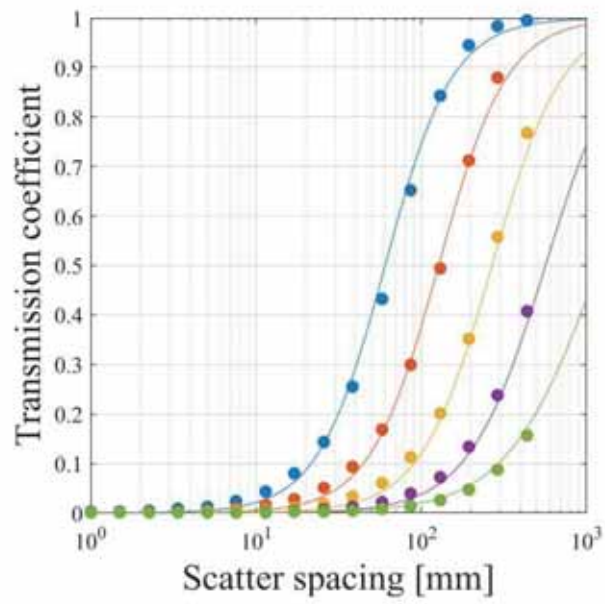
$$f = \frac{Er^F}{1 + e^{Gr^H\left\{\log_{r^I} \frac{d}{I} - J\right\}}}, \quad (10)$$

表 4.1.3： モデル 3 によるバンドギャップの最小透過率と周波数の予測式の係数

Transmission coefficient $\tau$	$A$	$B$	$C$	$D$		
Single	-0.0003212	0.9180505	1.0168069	-0.5030544		
Double	-0.0002768	1.9450724	1.0038788	-0.2070508		
Triple	-0.0002836	1.9575522	1.0038721	-0.1869193		
Frequency $f$	$E$	$F$	$G$	$H$	$I$	$J$
Single	61641.331	-1.0178940	0.1273137	0.2634125	-0.1390820	11.019653
Double	22731.933	-0.9147383	1.2747603	-0.1845825	0.715825	0.957147
Triple	13322.823	-0.978232	1.2451862	-0.1085686	1.003789	0.7217145



(a) Transmission coefficient



(b) Frequency

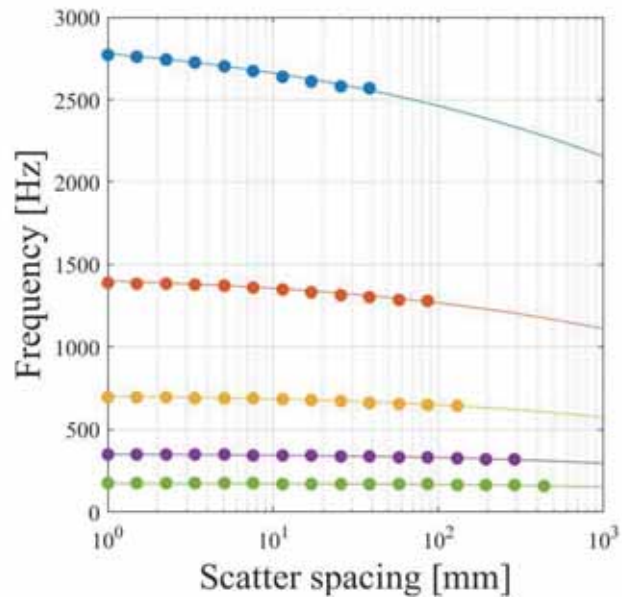
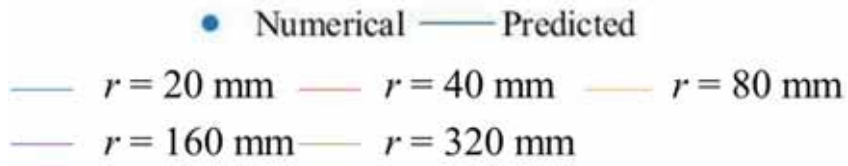
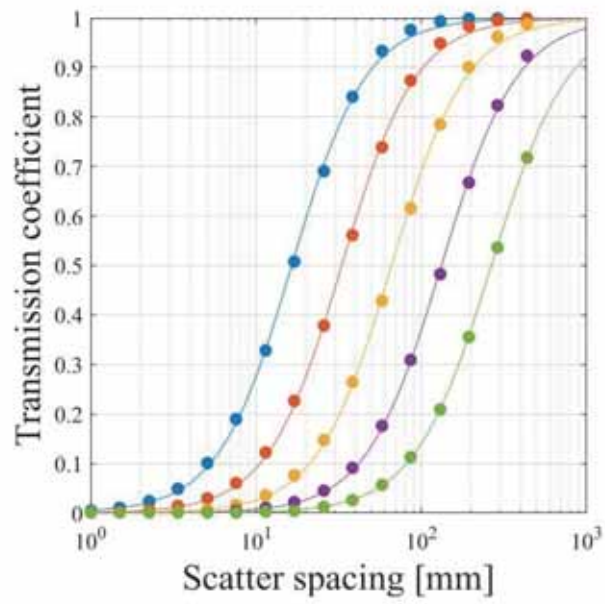


図 4.1.8 モデル 3 の散乱体を持つシングルソニッククリスタルの数値解析解と予測式



(a) Transmission coefficient



(b) Frequency

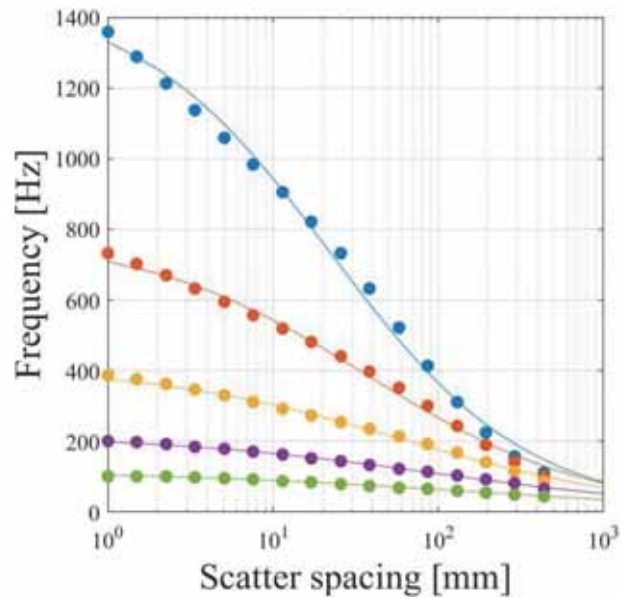
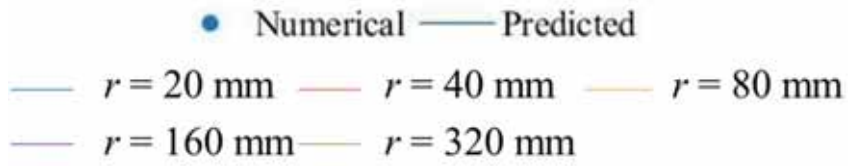
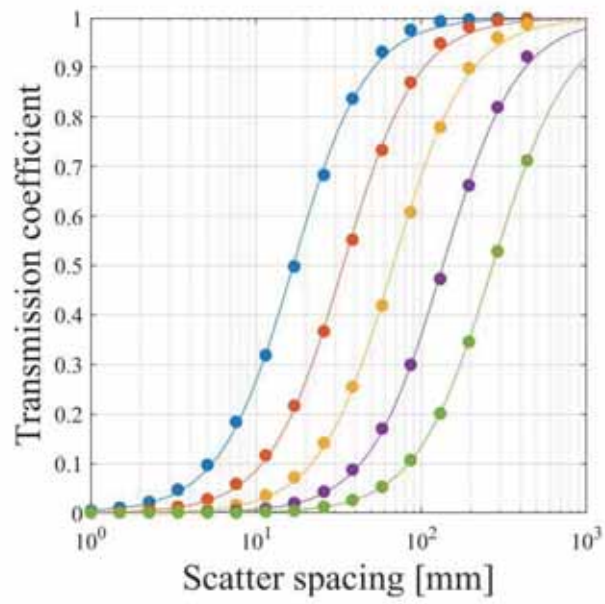


図 4.1.9 モデル 3 の散乱体を持つダブルソニッククリスタルの数値解析解と予測式



(a) Transmission coefficient



(b) Frequency

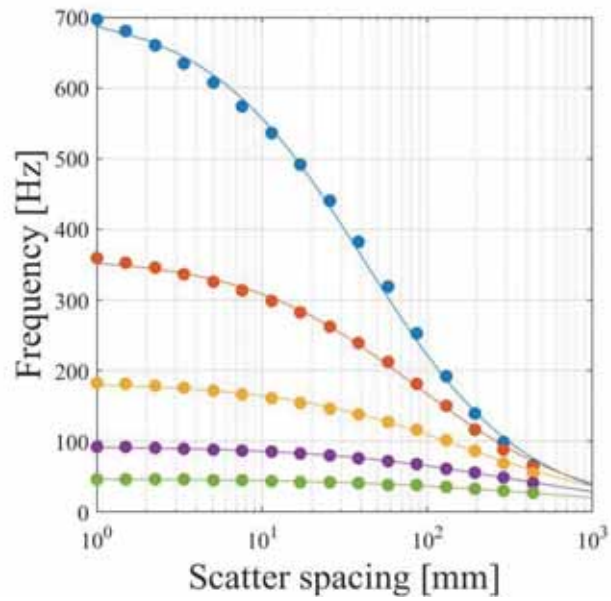


図 4.1.10 モデル 3 の散乱体を持つトリプルソニッククリスタルの数値解析解と予測式

#### 4.1.5 散乱体の断面形状による検討のまとめ

正方形と正三角形断面を持つ散乱体によるソニッククリスタルの数値解析結果をもとに予測式を作成し、その結果をもとに散乱体の断面形状がバンドギャップ特性に与える影響を検討した。どのモデルも、散乱体のパラメータとバンドギャップ特性の関係は円柱を用いた際と同様であり、前章の予測式の作成方法を用いて、予測式を作成することができた。表 4.1.4 には、それぞれのモデルの数値解析解と予測式の決定係数を示す。どの値も 0.99 を超えていることから、十分な精度を持った予測式の作成が行われた。

散乱体の断面によるシングルソニッククリスタルから得られるバンドギャップ特性は、円柱のソニッククリスタルと大きくは変化しなかったが、ダブル、トリプルの周波数ではバンドギャップの周波数に差が表れた。これは、バンドギャップの周波数範囲内に生じたピークが原因でバンドギャップが分割されたことが原因と考えられる。また、モデル 1 とモデル 2 の比較より、入射する角度と散乱体の各辺の角度によりピークの生じる周波数に影響を与えることが確認できた。この結果より、散乱体の形状は、円柱を用いることが安定したバンドギャップ特性を得られ、最も有効であると考えられる。

表 4.1.4 数値解析解と予測式の決定係数

		Single	Double	Triple
Transmission coefficient	Model1	0.9999	0.9997	0.9997
Bandgap frequency		0.9986	0.9999	0.9997
Transmission coefficient	Model2	0.9915	0.9982	0.9994
Bandgap frequency		0.9999	0.9999	0.9999
Transmission coefficient	Model3	0.9912	0.9998	0.9998
Bandgap frequency		0.9999	0.9979	0.9993

## 4.2 散乱体の配置方法による検討

### 4.2.1 検討するモデル

本節では、散乱体を4重に重複させたものと千鳥状に配置したものについて、予測式の作成と結果の検討を行った。図4.2.1に本節で扱うモデルを示す。モデル4は散乱体を4層に重ねて配置したものである。モデル5はダブルソニッククリスタルの1層を散乱体の中心間距離  $h$  [mm]の1/2ずらして設置する千鳥配置としたものであり、モデル6はトリプルソニッククリスタルを千鳥配置したものである。次節より、モデルごとの数値解析解と予測式を比較したグラフを示し、配置による効果の検討を行う。

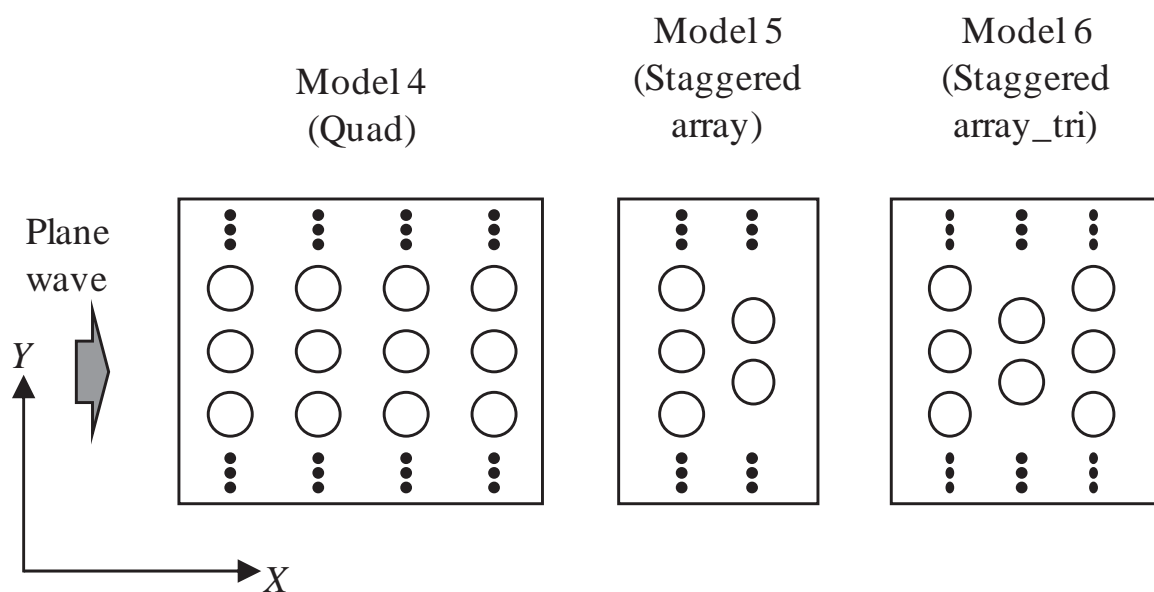


図 4.2.1 散乱体の配置方法のモデル



#### 4.2.2 モデル 4 の結果

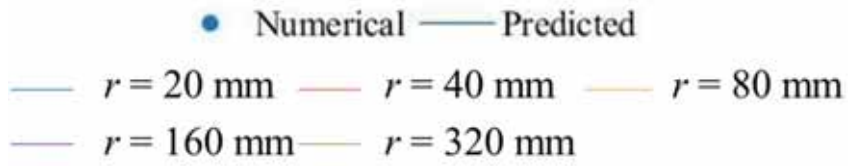
図 4.2.2 は、散乱体を 4 層に配置したモデル 4 のソニッククリスタルの数値解析解と予測式を前節と同様に比較したものである。どの条件の結果においても、数値解析解と予測式は近い値を取り、第 3 章と同様の予測式を用いて、予測式を作成することができた。しかし、シングルからダブル、ダブルからトリプルの変化による透過率の低下や、周波数の変化の度合いに比べ、トリプルからクアッドソニッククリスタルへの変化によるバンドギャップ特性の変化の度合いは小さい。本稿には掲載していないが、5 層以降に重ねた場合も徐々に変化の度合いは小さくなっていくことから、4 層以降に散乱体を重ねることによる効果は、3 層までの効果の増加と比較し、大きくないことが確認できた。

$$\tau = \frac{1}{1 + e^{-(Ar+B)\left\{\log_{r^g} \frac{d}{g} - D\right\}}}, \quad (11)$$

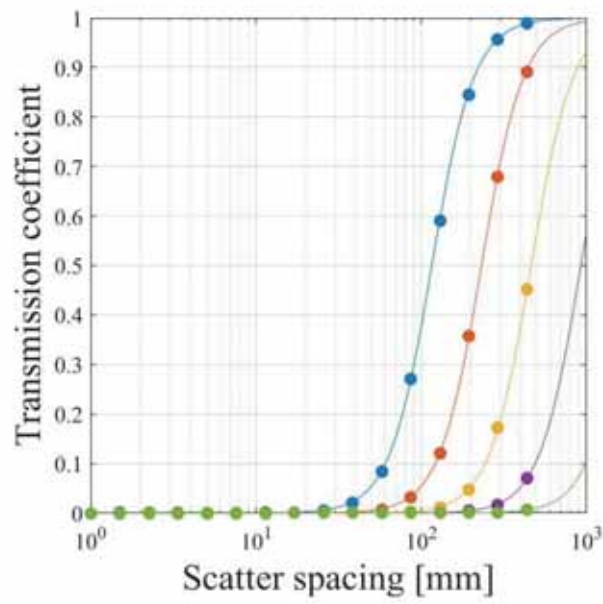
$$f = \frac{Er^F}{1 + e^{Gr^H\left\{\log_{r^I} \frac{d}{I} - J\right\}}}, \quad (12)$$

表 4.2.1：モデル 4 によるバンドギャップの最小透過率と周波数の予測式の係数

Transmission coefficient $\tau$	$A$	$B$	$C$	$D$		
	0.0004159	3.3790330	0.9998340	1.7590059		
Frequency $f$	$E$	$F$	$G$	$H$	$I$	$J$
	78613.029	-0.9854378	1.1216700	-0.0659915	0.9971750	0.6421878



(a) Transmission coefficient



(b) Frequency

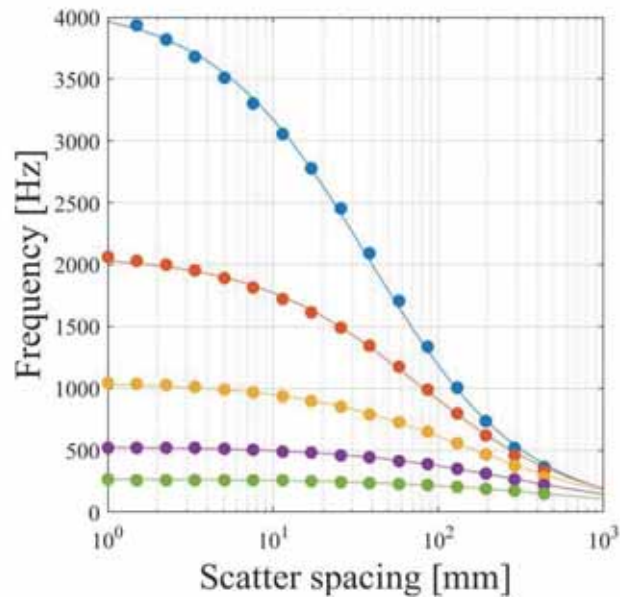


図 4.2.2 モデル 4 の配置をしたソニッククリスタルの数値解析解と予測式の比較

### 4.2.3 モデル5の結果

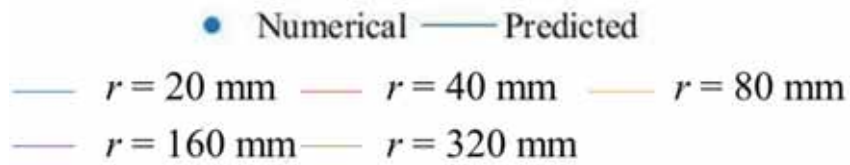
図 4.2.3 は、モデル5の配置をしたソニッククリスタルの数値解析解と予測式を前節と同様に比較したものである。表 4.2.2 には予測式の係数を示す。どの条件の結果においても、数値解析解と予測式は近い値を取り、第3章と同様の予測式を用いて、予測式を作成することができた。図 3.1.3 に示す、ダブルソニッククリスタルの結果と比較し、バンドギャップの周波数には少し差があったが、透過率はほとんど同じ値であった。千鳥配置によるソニッククリスタルのバンドギャップ特性は通常の配置方法のものと同じく変わらないことが確認できた。

$$\tau = \frac{1}{1 + e^{-(Ar+B)\left\{\log_{r^G} \frac{d}{G} - D\right\}}}, \quad (13)$$

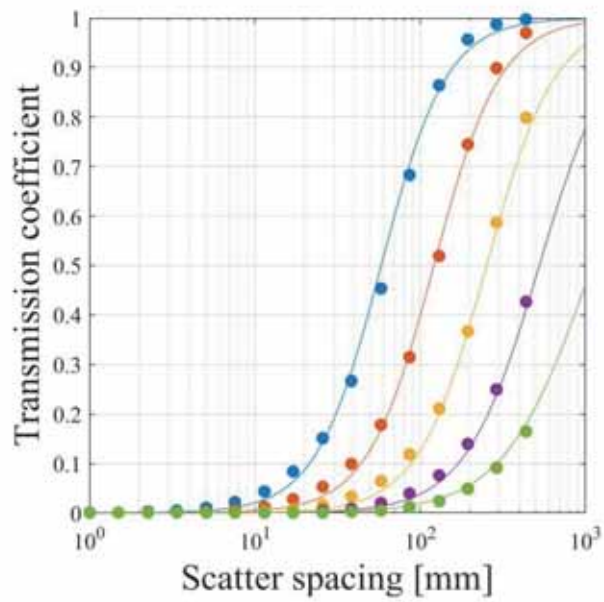
$$f = \frac{Er^F}{1 + e^{Gr^H\left\{\log_{r^I} \frac{d}{I} - J\right\}}}, \quad (14)$$

表 4.2.2：モデル5によるバンドギャップの最小透過率と周波数の予測式の係数

Transmission coefficient $\tau$	$A$	$B$	$C$	$D$		
	-0.0018325	2.2339277	1.0601063	0.8875486		
Frequency $f$	$E$	$F$	$G$	$H$	$I$	$J$
	64965.788	-0.996617	1.1481105	-0.0376816	1.0260727	1.0642310



(a) Transmission coefficient



(b) Frequency

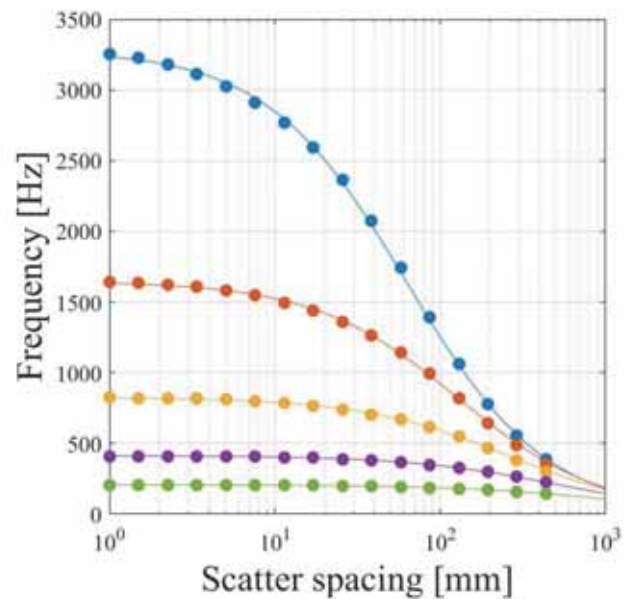


図 4.2.3 千鳥配置したソニッククリスタルの数値解析解と予測式の比較

#### 4.2.4 モデル 6 の結果

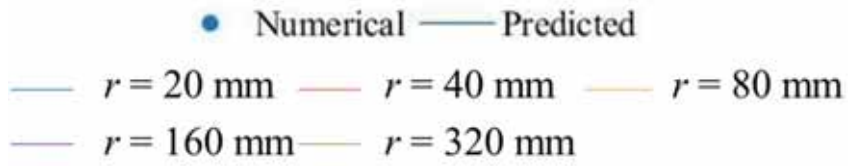
図 4.2.4 は、モデル 6 の配置をしたソニッククリスタルの数値解析解と予測式を前節と同様に比較したものである。表 4.2.3 には予測式の係数を示す。どの条件の結果においても、数値解析解と予測式は近い値を取り、第 3 章と同様の予測式を用いて、予測式を作成することができた。第 3 章第 1 節に示す円柱のソニッククリスタルと同様、三層にすることで、バンドギャップの最小透過率は小さくなっている。また、図 3.1.4 のトリプルソニッククリスタルと比較し、バンドギャップの透過率、周波数ともに大きくは変わっていない。モデル 5 の千鳥配置した二層のソニッククリスタルと同様、通常のソニッククリスタルと比較し、バンドギャップ特性は大きく変化しなかった。

$$\tau = \frac{1}{1 + e^{-(Ar+B)\left\{\log_{r^d} \frac{d}{g} - D\right\}}}, \quad (15)$$

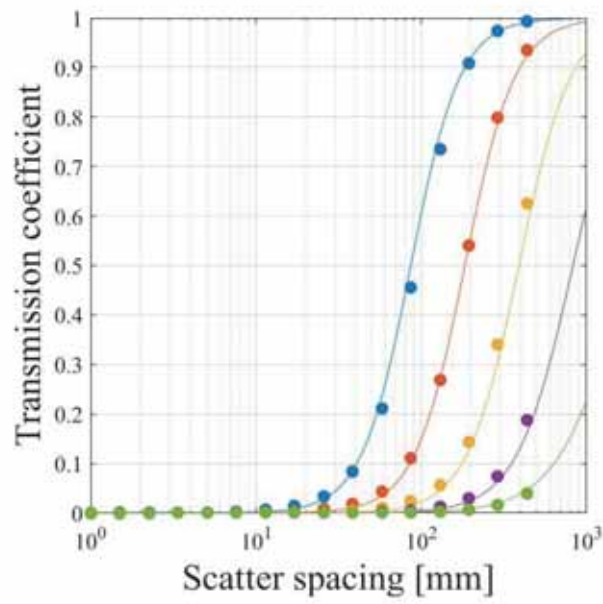
$$f = \frac{Er^F}{1 + e^{Gr^H\left\{\log_{r^d} \frac{d}{g} - J\right\}}}, \quad (16)$$

表 4.2.3：モデル 6 によるバンドギャップの最小透過率と周波数の予測式の係数

Transmission coefficient $\tau$	$A$	$B$	$C$	$D$		
	-0.0025249	2.9622686	1.0879614	1.2013655		
Frequency $f$	$E$	$F$	$G$	$H$	$I$	$J$
	68295.546	-1.0018004	1.0309066	0.0059519	1.0018028	1.0720178



(a) Transmission coefficient



(b) Frequency

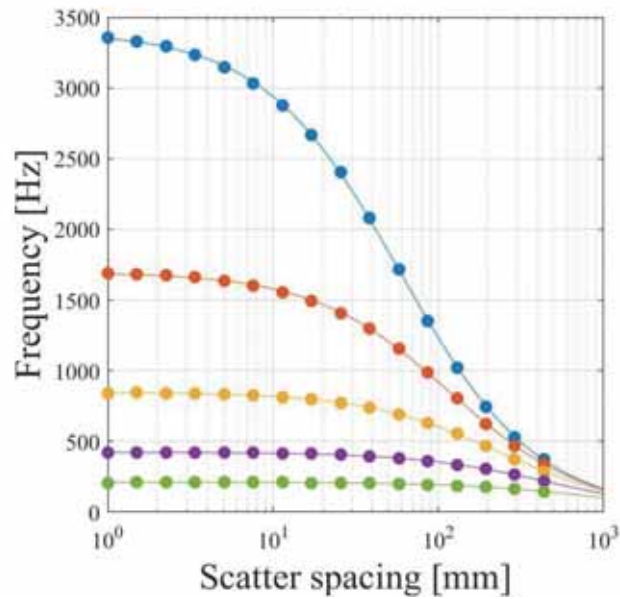


図 4.2.4 千鳥配置した3層のソニッククリスタルの数値解析解と予測式の比較

#### 4.2.5 散乱体の配置方法による検討のまとめ

4層に散乱体を配置したモデル4、千鳥配置をしたモデル5、3層に千鳥配置したモデル6のそれぞれのソニッククリスタルについて、第3章に示す予測式の作成方法を用いて、予測式を作成した。配置方法を変えた場合も、おおむね近い値を示す予測式を作成することができた。また、表4.2.4には、それぞれのモデルの数値解析解と予測式の決定係数を示す。どの値も0.99を超えており、高い精度の回帰近似を行えたことが確認でき、予測式として高い精度を持つと考えられる。

ソニッククリスタルの散乱体を重ねて設置するほどソニッククリスタルによる影響をより大きく受けることが第3章第1節より確認でき、さらに層を重ねた4層のソニッククリスタルの検討を行った。しかし、トリプルまでのソニッククリスタルの1層あたりの効果の増加量に対する4層以降の効果は小さく、4層以降に重ねることは効果的でないことが明らかになった。

第2章で得られた数値解析の結果より、散乱体同士の間隔は透過率に影響を与えており、ソニッククリスタルの効果向上に向け、重要な点の一つであることが明らかになった。そこで、1層をずらして配置することにより、散乱体の隙間をすり抜ける音波を妨げ、高い遮音効果を持つことを期待し、検討を行った。しかし、本稿の結果では、千鳥配置による効果を確認することはできなかった。

表 4.2.4 数値解析解と予測式の決定係数

	Model 4	Model 5	Model 6
Transmission coefficient	0.999	0.998	0.998
Frequency	0.999	0.999	0.999

## 5 実験

### 5.1 実験条件の決定

第 3 章で作成した予測式の精度の確認を行うため、実際のソニッククリスタル遮音壁を作成し、実験を行った。遮音の対象として幼稚園や保育園から発せられる子供の声を設定し、予測式を用いて有効なバンドギャップを保有するソニッククリスタルのパラメータを予測する。対象とする子供の声のピーク周波数は 1000~2000 Hz 付近にあるとされており、今回は中間の 1500 Hz を対象のピーク周波数とした。第 4 章での検討より、散乱体の形状や配置方法によるバンドギャップ特性の検討を行ったが、円柱を用いた通常のソニッククリスタルを超える効果を持つものは発見できなかったため、実験では散乱体の形状は円柱を採用した。また、ダブル、トリプルソニッククリスタルを採用するほど遮音効果としては高いと予想されるが、バンドギャップの周波数範囲内にピークが生じ、バンドギャップが分割されることが第 3 章で確認された。本実験で対象とする高周波数帯の騒音は低周波数帯と比較し、幅広い周波数範囲にピークを持つことが考えられるため、これは不利に働くことが考えられる。これより、実験ではシングルソニッククリスタルを用いることとした。実験条件では、乱入斜条件に近い環境となるため、第 3 章第 2 節第 1 項に示す、乱入斜条件での予測式を用いる。半径 30 mm、配置間隔 30 mm のシングルソニッククリスタルにより対象のピーク周波数と近い 1459 Hz で最小透過率 0.34 のバンドギャップが発生することが予測されたため、この寸法でソニッククリスタル遮音壁を作成した。



## 5.2 実験条件

図 5.2.1 は、ソニッククリスタルに用いる散乱体の断面図である。直径 60 mm、厚さ 5 mm、高さ 2000 mm の塩ビ管パイプを用い、隣接する散乱体とは中心間距離を 90 mm とすることとした。図 5.2.2 には、ソニッククリスタル遮音壁の全体図を示す。散乱体は 35 本用意し、幅 3150 mm のソニッククリスタル遮音壁を作成した。土台には奥行き 700 mm、幅 3260 mm の木板を用い、塩ビ管パイプを支持した。遮音壁の左右には吸音材を設置し、周り込みによる音の侵入を阻止した。

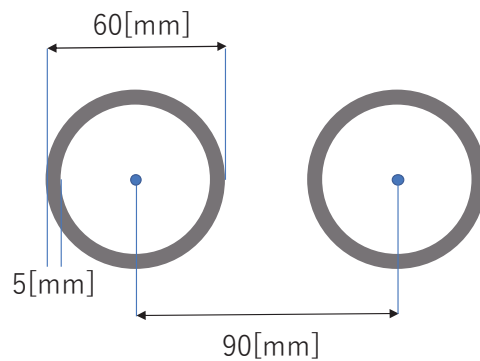


図 5.2.1 散乱体として使用した塩ビ管パイプの断面図

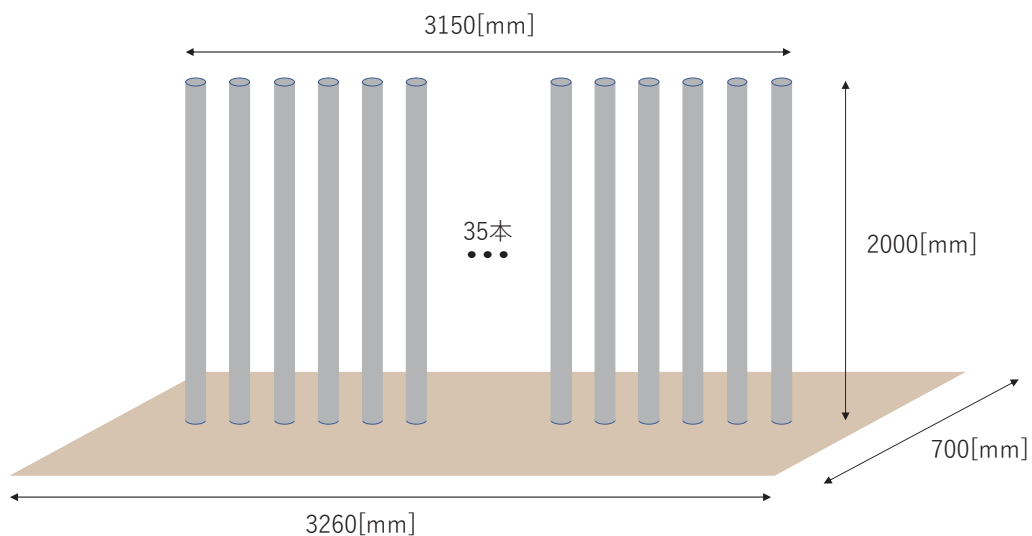


図 5.2.2 ソニッククリスタル遮音壁の全体図

図 5.2.3 は、横から見たソニッククリスタルのモデルであり、図 5.2.4 は作成したソニッククリスタル遮音壁と実験の様態である。実験は無響室内で行い、マイクとスピーカーを高さ 1100 mm とし、それぞれ遮音壁から 1000 mm 離して設置した。これらを用いて、TSP 信号を用いたインパルス信号の録音を行う。ソニッククリスタル遮音壁を設置した際と、取り除いた場合でそれぞれ測定を行い、ソニッククリスタル遮音壁の挿入損失を求めた。

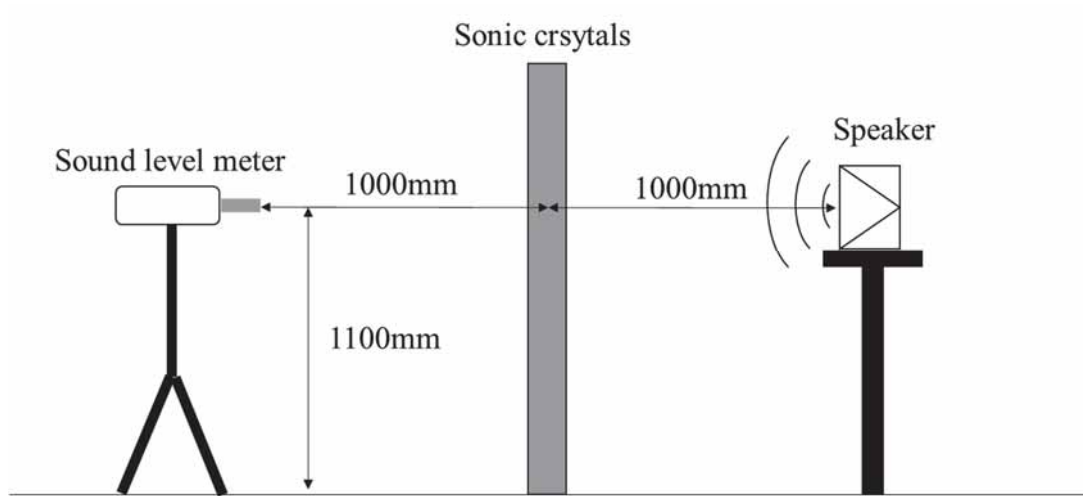


図 5.2.3 横から見たソニッククリスタルのモデル

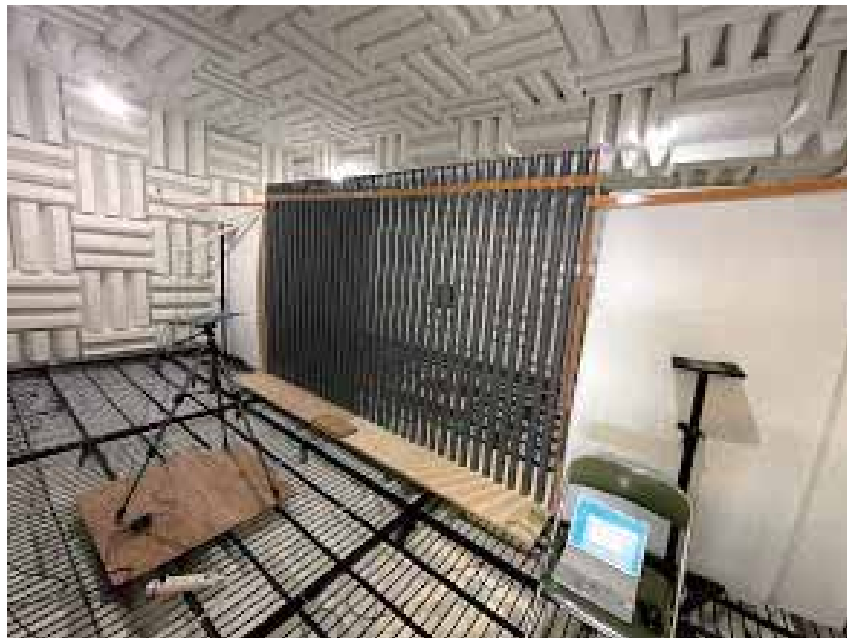


図 5.2.4 実験風景

### 5.3 実験結果

実験により得られたソニッククリスタル遮音壁の挿入損失を図 5.3.1 に示す。実験値とともに、実験と同様の条件で垂直入射と乱入斜による数値解析を行った結果を併せて表示している。横軸は周波数、縦軸は透過損失を示し、青線が乱入斜条件での数値解析による結果、オレンジの線が垂直入射条件での数値解析による結果、黄線が実験による挿入損失のグラフである。

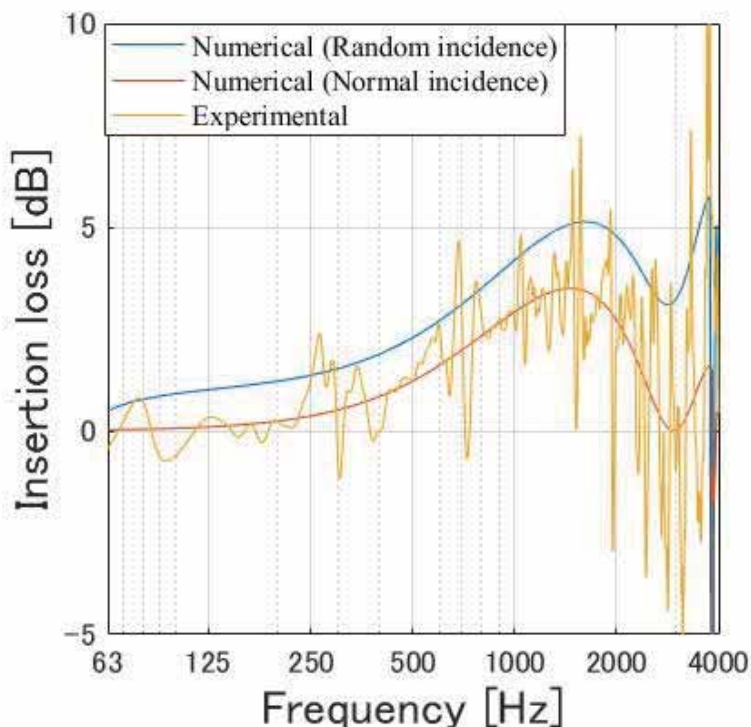


図 5.3.1 実験値と乱入斜条件での解析結果

黄線で示す実験値は 1000Hz~2000Hz 付近に透過損失のピークを持っている。実験値にはピークやディップが多く表れ、バンドギャップの最小透過率やその周波数を読み取ることが難しいが、予測式を用いて予測したバンドギャップの発生周波数 1459[Hz]と最小透過率 0.34 の値とはおおむね近いところにバンドギャップが現れている。また、青線とオレンジの線で示す数値解析解のグラフと比較し、同様のカーブを持ち、バンドギャップ付近以外の周波数帯においても近い周波数特性を持った結果であった。しかし、実際の実験条件に近いと考える乱入斜条件のグラフと比較し、垂直入射条件でのグラフとの方が実験値に近い値を示した。これは、ソニッククリスタル遮音壁とスピーカーやマイクとの位置関係から、垂直入射に近い条件になったことが原因であると考えられる。しかし、ソニッククリスタル遮音壁による挿入損失は予想した値と変わらず 5 dB 程度であり、実際に遮音壁として使用するためには不十分な遮音性能である。今後、複層のソニッククリスタルや、他の吸音材量との併用などを検討し、遮音効果を高める必要がある。

## 6 まとめ

ソニッククリスタルによるバンドギャップ特性の予測式を作成した。さらに、様々な条件での予測式を作成し、その精度の確認とともに様々な条件でのバンドギャップ特性の検討を行った。

数値解析の結果から、ソニッククリスタルの散乱体の間隔とバンドギャップ特性の間には関係性が見られ、シグモイド関数と呼ばれる関数を近似関数とし、回帰近似を行うことで、比較的精度の高い近似を行うことができた。これを利用し、散乱体の間隔と半径から、バンドギャップの最小透過率とその周波数を予測する予測式を作成することができた。これは、乱入斜条件でも適用することができ、平面波入射の結果とおおむね近い値をとることを確認した。また、同様の方法を用いて、散乱体の断面を変えた解析結果や配置を変えた解析結果においても予測式を作成することができた。円柱状散乱体の解析結果の予測式と比較し、精度は少し落ちるが、おおむねの予測は可能であることがわかった。また、それらのバンドギャップ特性と円柱状のソニッククリスタルの特性の比較を行い、円柱状の散乱体を用いて、トリプルソニッククリスタルとして用いることが最も高い性能を持つことが確認できた。

作成した予測式の精度の確認とともに、数値解析解と実際の性能の比較を行うため、実験を行った。従来の研究で扱われていない高周波数帯域の騒音である子供の声を対象騒音と設定し、予測式をもとにソニッククリスタル遮音壁を作成し、実験を行った。結果から、予測式により予測したバンドギャップ特性とおおむね一致した遮音特性と持っており、ある程度の予測ができたと考える。また、数値解析解と実験値を比較し、全体的に近い結果を示すことから、数値解析を用いた予測式は実用に向け使用が可能であると考えられる。

本稿で提案した予測式により、標準的なソニッククリスタルの予測が可能になると考えられるが、現状でのソニッククリスタル遮音壁の遮音効果は従来の遮音壁と比較し、十分でなく、他の遮音機構と合わせた検討などを行い、さらに効果の高いソニッククリスタル遮音壁の開発が必要である。今後、本稿で扱った以外のパラメータや新たな種類のソニッククリスタルについても予測式の検討を行い、ソニッククリスタルの実用化に向け、更新を行うことが望まれる。

## 参考文献

- [1] R. Martínez-Sala, J. Sancho, J. V. Sánchez, V. Gómez, J. Llinares, and F. Meseguer, “Sound attenuation by sculpture,” *Nature* 378, 241, 1995.
- [2] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, and J. N. Winn, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*, Princeton University Press, 1995.
- [3] C. M. Soukoulis, *Photonic Band Gaps and Localization*, Springer, 1992.
- [4] L. Fredianelli, A. D. Pizzo, and G. Licitra, “Recent developments in sonic crystals as barriers for road traffic noise mitigation,” *Environments* 6, 14, 2019.
- [5] COMSOL Multiphysics®, <https://www.comsol.jp/comsol-multiphysics>, (Reference January 2021).