

フレーム構造の音響特性に関する数理モデルの構築

令和4年2月

佐藤隆政

新潟大学大学院自然科学研究科博士後期課程

材料生産システム専攻

目次

フレーム構造の音響特性に関する数理モデルの構築.....	1
目次.....	2
第1章 緒論.....	5
1.1 自動車業界における騒音課題.....	5
1.2 防音材料の開発.....	5
1.3 計算科学の動向.....	5
1.4 本研究の目的と論文構成.....	6
1.5 参考文献.....	7
第2章 吸音率測定装置.....	9
2.1 吸音率の概念.....	9
2.2 測定装置.....	9
2.3 参考文献.....	12
第3章 理論解析.....	13
3.1 音響管の伝達マトリックスによる表現.....	13
3.2 均質材料の吸音率算出法.....	14
3.3 任意構造での吸音率の算出.....	15
3.4 平行な2平面への近似.....	16
3.5 平行な2平面間のすきまにおける特性インピーダンスと伝搬定数.....	18
3.6 伝達マトリックスの接続.....	20
3.6.1 縦続接続.....	21
3.6.2 並列接続.....	21
3.7 参考文献.....	22
第4章 剣山状構造.....	23
4.1 緒言.....	23
4.2 試料.....	23
4.3 平行な2平面への近似.....	25
4.4 伝達マトリックスの算出.....	27
4.4.1 y軸方向1層の伝達マトリックス.....	27
4.4.2 試料全体の伝達マトリックス.....	29
4.5 吸音率の算出.....	29
4.6 実験結果.....	30
4.7 パラメータスタディ.....	31
4.8 結言.....	33

4.9	参考文献.....	33
第5章	剣山状構造の円柱に垂直な方向から音波が入射した場合.....	35
5.1	緒言.....	35
5.2	試料.....	35
5.3	解析ユニットにおける平行な2平面への近似.....	38
5.3.1	2本の円柱間における解析ユニット.....	38
5.3.2	円柱1本と試料ホルダー内壁に囲まれた解析ユニット.....	42
5.4	平行な2平面間のすきまにおける伝搬定数と特性インピーダンス.....	44
5.5	伝達マトリックスの算出.....	45
5.5.1	解析ユニットの伝達マトリックス.....	45
5.5.2	円柱群1層の伝達マトリックス.....	46
5.5.3	試料全体の伝達マトリックス.....	47
5.6	吸音率の算出.....	47
5.7	実験結果.....	48
5.8	パラメータスタディ.....	49
5.9	結言.....	51
5.10	参考文献.....	51
第6章	網目構造・フレーム構造.....	53
6.1	緒言.....	53
6.2	試料.....	53
6.3	網目構造における吸音率の理論解析.....	57
6.3.1	円柱4本に囲まれた解析ユニット.....	57
6.3.2	円柱3本と試料ホルダー内壁に囲まれた解析ユニット.....	58
6.3.3	円柱2本と試料ホルダー内壁2面に囲まれた解析ユニット.....	59
6.3.4	各解析ユニットの伝達マトリックス.....	66
6.3.5	円柱群1層の伝達マトリックス.....	67
6.3.6	網目構造の試料全体の伝達マトリックス.....	70
6.3.7	吸音率の算出.....	71
6.4	フレーム構造における吸音率の理論解析.....	71
6.4.1	剣山層における解析ユニット.....	71
6.4.2	網目層における円柱4本に囲まれた解析ユニット.....	74
6.4.3	円柱3本と試料ホルダー内壁に囲まれた解析ユニット.....	80
6.4.4	円柱2本と試料ホルダー内壁2面に囲まれた解析ユニット.....	84
6.4.5	剣山層の伝達マトリックス.....	88
6.4.6	網目層の解析ユニットにおける伝達マトリックス.....	88
6.4.7	網目層の伝達マトリックス.....	89

6.4.8	試料全体の伝達マトリックス	93
6.4.9	吸音率の算出.....	94
6.5	実験結果	94
6.6	構造間の吸音特性比較	97
6.7	結言	98
6.8	参考文献	98
第7章	結論	100
謝辞	102

第1章 緒論

1.1 自動車業界における騒音課題

近年、自動車業界ではハイブリッド車をはじめとしてモータを駆動源とした電動車が増加している。また、中国、欧州の自動車の電動化への取組は日本よりも積極的である。今後、電動化の動きは加速すると考えられ減速する事は考えにくい。

これまでの内燃機関による駆動から電動駆動に変わる事で一般的には自動車が静かになるという印象がある。しかし、実際には騒音対策への要求は減らない。従来は内燃機関による騒音で隠れていた騒音源が電動化により顕著になったためである [1]。また、従来と異なる騒音である為、これまでの知見だけでは対応しきれない事も考えられる。

また、車外騒音規制も 2024 年には更に強化されることからより多くの騒音に関する対策案が必要となる [2] [3]。

このような背景から、現存する防音技術に新しい知見や技術を追加する事で静粛化の要求に対応する事が必要不可欠である。近年ではシミュレーションを活用して製品の開発を行う事も日常的となっており、音響分野についても同様である [4] [5] [6]。

1.2 防音材料の開発

騒音対策としては吸音材に代表される防音材料の使用が挙げられる。吸音材はフォーム材、不織布、グラスウールなどで構成される。これらの吸音材についてはその音響物性値を音響シミュレーションに入力する事で、空間の音響予測を行う。

空間の音響を設計する場合と、吸音材を提供する場合には検討する範囲がそれぞれ異なる。前者ではある領域に目的を達成する為の音響特性を有する吸音材が必要となり、後者は必要とされる音響特性を実現する為の材料開発を行う事となる。

吸音材については吸音に対する基本的なメカニズムが明らかになっており、材料を提供する際は過去の知見を踏まえながら材料を開発する。しかし、前述の音響物性値に関しては製作した材料について測定を行う必要があり、空間の音響シミュレーションを行う際にも材料の測定を伴う。

材料開発の際にも音響物性値を予測でき、測定回数を削減するような仕組みがあるのが理想であり、その手段として材料の製作条件や使用する素材の組合せによる音響物性値の結果から経験式を構築する事で開発の効率を上げるなどの事例がある [7] [8]。

1.3 計算科学の動向

先述の通りシミュレーション技術が製品開発の中で日常的に活用されており、開発効率は向上している。自動車業界では構造シミュレーション、流体シミュレーションなどが多く

利用される傾向である。これらのシミュレーションは 3D-CAD から形状データを取り込み、その形状に沿う要素を作成し、材料情報、境界条件等を設定して物理シミュレーションを行う。これらのシミュレーションは主に詳細設計で利用される。このような開発の流れに対し、近年、1DCAE という概念が提案されている [9]。

1DCAE は製品開発において、3D-CAD などの形を作る前に機能として全体を設計する概念であり、1D と 3D を使い分ける事でより良い製品がより速く実現される。

1.4 本研究の目的と論文構成

このような背景から、吸音材の吸音特性を製作する前に予測する事ができれば騒音対策の開発に有意義と考えられる。本研究ではフォーム材の基本骨格をフレーム構造と見立て、その構造の吸音特性を推定する数理モデルの構築を目的とする。数理モデルは一次元の伝達マトリックス法で構築する。その意図としては、前節で述べた 1DCAE の考え方に沿う役割を持たせる為である。フレーム構造の基本骨格を構想段階で検討し、有望な構造について具体的に 3D の詳細シミュレーション、又はサンプルを製作するなどの開発フローを実現する。又は、数理モデルの解析から得られる吸音特性を音響シミュレーションの吸音特性として使用する事も可能となる。

当該の数理モデルを構築するにあたり、フレーム構造を構成する基本構造の数理モデルを構築しながら段階的にフレーム構造の数理モデルへ拡張した。本論文は以下の構成となる。

第 1 章は「緒論」として騒音対策の課題、吸音材開発の現状、及びそれらを鑑みて研究の目的、意義を述べた。

第 2 章では本研究に用いた測定装置について述べる。第 3 章では均一材料と対象とした場合の材料特性と吸音率の関係を述べた後、本研究で扱う任意構造における吸音率の理論的推定に利用する共通の技術について述べる。音波が微小なすきまを進行する際に、粘性抵抗によって音のエネルギーが熱エネルギーに変換される現象が、フォーム材をはじめとした多孔質吸音材に共通したメカニズムである [10] [11] [12]。本研究では任意の構造におけるすきまの効果を推定する為に「平行な 2 平面への近似」と「伝達マトリックス法」を応用しており、一般的な考え方について述べる。

第 4 章では剣山状構造における吸音特性について扱う。剣山状構造はフレーム構造を構成する要素の一部であり、その吸音特性に関する数理モデルを構築する。音波が進行する空隙は単純な幾何形状ではない為、第 3 章の「平行な 2 平面への近似」を応用する。更に対象の試料における吸音率について実験結果と数理モデルによる解析結果を比較し、数理モデルの有用性を示す。

第 5 章では剣山状構造において音波が側面から入射する場合の吸音特性について扱う。音波が側面から入射する場合は、入射側から見た空隙部の面積が変化する。そのため第 4 章

で扱った方法とは異なる方法で数理モデルを構築する。第4章と同様、吸音率について実験結果と数理モデルによる解析結果を比較し、数理モデルの有用性を示す。

第6章では網目・フレーム構造を対象とした吸音特性について扱う。第5章までに扱った剣山状構造を構成する円柱が垂直に交差する構造となる。この場合は、音波の入射側から見た空隙の面積が連続的に変化する上、第5章で扱った構造よりも空隙部の扱いが複雑であり、これまでの実施内容を応用する。網目・フレーム構造と2種類を対象とするが、前者は円柱が交差する点に焦点をあて、数理モデルを構築する。網目構造の数理モデルを拡張して後者のフレーム構造の数理モデルを構築する。第5章までと同様、吸音率について測定結果と数理モデルによる解析結果を比較し、数理モデルの有用性を示す。

第7章では、本研究で得られた結論を述べ、総括を行う。

1.5 参考文献

- [1] Jan FISCHER, Matthias BEHRENDT, Dirk LIESKE, Albert ALBERS, “Measurement and analysis of the interior noise and the transfer path of acoustic phenomena into the driver cabin of a battery electric vehicle,” Proceedings of INTER-NOISE 2014, Paper No. 110, Melbourne, Australia, 2014.
- [2] 国土交通省, “協定規則第 51 号”, 2016
- [3] GRB Expert Group on Regulation No.51 , “Proposal for the 03 series of amendments to Regulation No.51 (Noise of M and N categories of vehicles),” Informal document GRB-58-04, 2013.
- [4] 平野洸祐, 高橋亜佑美, 見坐地一人, “繊維系防音材料の音響数理モデル化に関する研究,” 日本大学生産工学部, 2018.
- [5] 河合英樹, 柳瀬純一, 天神 重樹, 塩崎 弘隆, “車室外音場の音響伝達予測手法の高効率化,” TSUBAME 産業利用トライアルユース 成果報告書, 2015.
- [6] 吉田史郎, “音響解析ソフトによる定在波の計算 (理論解との比較),” 日本機械学会 第 30 回計算力学講演会講演論文集, No.17-4, 講演番号 158, 3 頁, 東大阪市, 2017.
- [7] 見坐地一人, 石井仁樹, 高橋亜佑美, 三木達郎, 藤澤生磨, 安藤大介, “繊維体吸音材料の Biot パラメータの推定,” 自動車技術会 2017 年秋季大会学術講演会講演予稿集, pp. 493-499, 2017.
- [8] 加藤大輔, “多孔質材料内伝搬音の予測モデル,” 日本音響学会誌 63 巻 11 号, pp. 635-645, 2007.
- [9] 日本機械学会 設計工学・システム部門, “1DCAE とは,” [オンライン]. [アクセス日: 2022].
- [10] M.E. Delany and E.N. Bazley, “Acoustical properties of fibrous absorbent materials,” Applied Acoustics , Vol. 3, No. 2, pp. 105-116, 1970.

[11]一宮亮一, わかりやすい静音化技術, 森北出版, pp. 179-181, 2011.

[12]子安勝, “吸音材料の歴史と展望,” 音響技術, No. 24, pp.1-5, 1978.

第2章 吸音率測定装置

2.1 吸音率の概念

本節では一般的な吸音率について述べる[1]. 図2-1に示すように, 吸音材に対し入射する音の強さを I_i , 反射する音の強さを I_r とすると, 吸音率 α は以下のように定義される.

$$\alpha = 1 - \frac{I_r}{I_i} \quad (2-1)$$

α が高いと吸音材の吸音効果が高くなる. 壁などの吸音率が低い場合は反射する音が大きくなり, 場合によっては反響が起きる事もある為, 室内音響状態が悪化する.

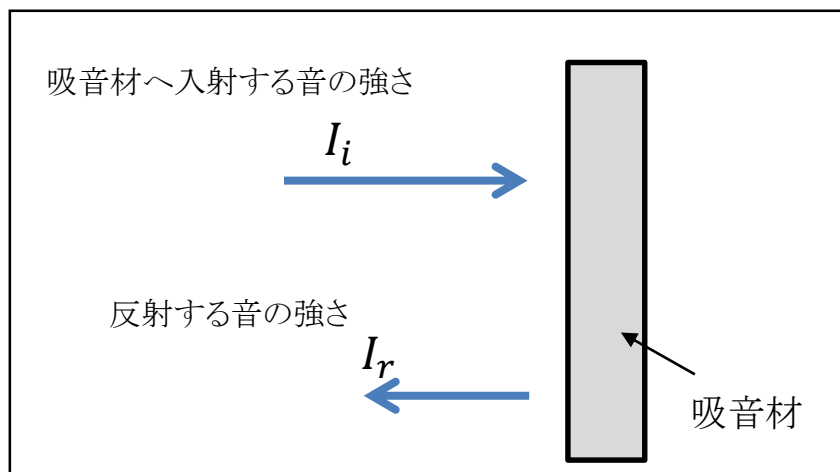


図2-1 吸音材に入射する音波と反射する音波

2.2 測定装置

本節では本研究で使用した吸音率の測定装置について述べる. 測定装置の構成を図2-2に示す. Brüel & Kjær 4206型2マイクロホンインピーダンス管(以下音響管)を使用した. 図2-3は実際の音響管の写真である. 試料を音響管内に封入し, FFTアナライザ内蔵の信号発生器より正弦波信号を生成し, スピーカーによって音響管内に音波を入射する. 音響管に取り付けられた2本のマイクロホンの音圧信号間の伝達関数をFFTアナライザにより測定する. 測定された伝達関数を用いISO 10534-2に準拠し垂直入射吸音率を算出する. 音響管は内径により平面波の成立限界周波数が異なる.

本研究で扱った試料では低周波数域における吸音率が高くないため, 一辺25.7 mmの小型矩形管を用いた. そのため, 500~6400 Hzが測定範囲である. 音響管の断面は直径が29mmの円形である. 試料の断面が正方形のため, 図2-4に示すような, 円形から正方形

に断面形状を変更する変換管を使用した。断面形状の変換により断面積が同一となるように、正方形の一辺の長さは 25.7mm とした。

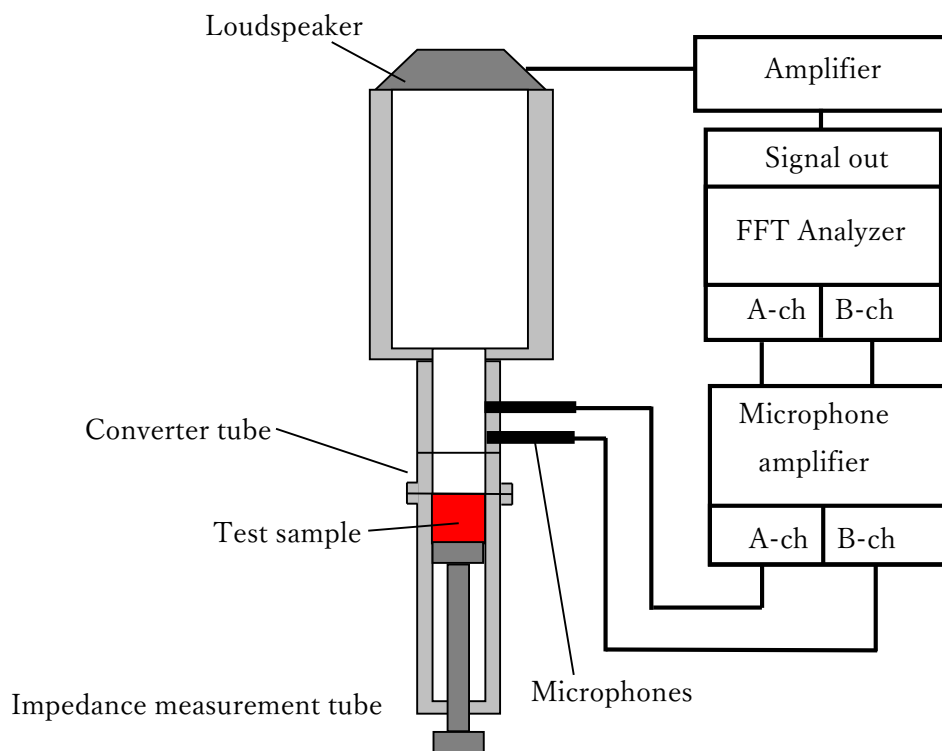


図 2-2 吸音率を測定する音響管のブロック図



図 2-3 本研究で使した音響管

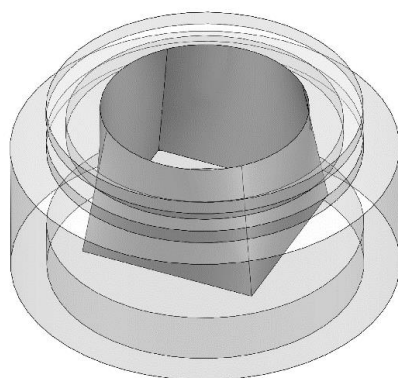


図 2-4 円形断面から矩形断面への変換管

2.3 参考文献

- [1] 一宮亮一, わかりやすい静音化技術, 森北出版, pp. 167-169, 2011.

3.2 均質材料の吸音率算出法

一般的な試料を用いる際の吸音率の算出法を述べる[3]. この算出法は試料をマクロ構造(均質材料)として算出する場合であり, 対象の試料における実効複素密度 ρ_e や, 複素体積弾性率 K_e が把握できている事を前提とする.

試料の材料特性としては特性インピーダンス Z_c が使用され, 次式で定義する.

$$Z_c = \frac{p}{u} = \rho_e c_e = \sqrt{\rho_e K_e} \quad (3-3)$$

ここで, p と u は定常状態の平面波が一方向に伝搬する材料内での音圧と粒子速度, K_e は複素体積弾性率である.

次に, 伝搬定数 γ である. 伝搬定数は次式に定義される.

$$\gamma = \frac{i\omega}{c_e} = ik_e = i\omega \sqrt{\frac{\rho_e}{K_e}} \quad (3-4)$$

i は虚数単位, ω は角周波数, k_e は複素波長定数である.

比音響インピーダンス Z_0 は試料表面の音圧 p_1 と粒子速度 u_1 の比で定義される.

$$Z_0 = \frac{p_1}{u_1} \quad (3-5)$$

剛壁面に密着された厚み l の Z_0 は伝達マトリックスにおいて剛壁面の粒子速度 u_2 を0とし, 次式で表される.

$$Z_0 = Z_c \coth \gamma l \quad (3-6)$$

複素音圧反射係数(反射率) R は試料表面の入射音圧 p_i と反射音圧 p_r の比で定義される.

$$R = \frac{p_r}{p_i} \quad (3-7)$$

試料表面の R は比音響インピーダンス Z と固有音響抵抗 $\rho_0 c_0$ によって以下のようになる.

$$R = \frac{Z_0 - \rho_0 c_0}{Z_0 + \rho_0 c_0} \quad (3-8)$$

垂直入射吸音率 α は R を用いて以下のように定義される.

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (3-9)$$

3.3 任意構造での吸音率の算出

前節では均質材料における吸音率を扱ったが、本研究では任意の構造の試料を対象とする。本節では、簡易的な構造を例として任意の構造を対象とした場合の吸音率の推定方法について述べる。

例として用いる構造を図3-2に示す。Plane1は音波の入射面、Plane2は終端であり、剛壁である。その他Plane1を構成する周囲の面も剛壁とする。円筒形の試料と周囲の剛壁に囲まれた領域は音響媒体の隙間となる。

隙間の入口端と終端について、それぞれの音圧を p_1 、 p_2 、粒子速度を u_1 、 u_2 とおくと、伝達マトリックスは式(3-10)のように表される。

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ Su_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_2 \\ Su_2 \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

隙間の終端は剛壁の為、粒子速度 $u_2 = 0$ であることから次式が導出される。

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ Su_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11}p_2 \\ t_{21}p_2 \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

Plane1から直ぐ外側の音圧及び、粒子速度を p_0 、 u_0 とおくと、試料の入射面から内部を見た比音響インピーダンス Z_0 は次式のように表せる。

$$Z_0 = \frac{p_0}{u_0} \quad (3-12)$$

更に、 $p_0 = p_1$ 、 $S_0u_0 = Su_1$ の関係と式(3-11)から式(3-12)は次のように表される。

$$Z_0 = \frac{p_0}{u_0} = \frac{p_0}{u_0 S_0} S_0 = \frac{p_1}{u_1 S_1} S_0 = \frac{t_{11}}{t_{21}} S_0 \quad (3-13)$$

比音響インピーダンス Z_0 と反射率 R の関係は以下のようなになる。

$$R = \frac{Z_0 - \rho_0 c_0}{Z_0 + \rho_0 c_0} \quad (3-14)$$

反射率 R を用いて吸音率 α は以下のように表される。

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (3-15)$$

吸音率 α を求める為に、比音響インピーダンス Z_0 が必要であり、 Z_0 を求める為には特性インピーダンス Z_c と伝搬定数 γ が必要になるが、それらの導出は均質材料の場合と異なる。

3.4 平行な2平面への近似

任意の構造における音響特性を求める為に、音波方向に垂直な断面を平行な2平面へ近似する。図3-2は任意の構造の例であり、図3-3に平行な2平面への近似例を示す。

近似の方法としては任意の断面において、断面積を維持し、音響媒体が接する周長を同値にする。図3-3(b)について音響媒体部の断面積 S_p は次式で表せる。

$$S_p = L_s^2 - \frac{D_p^2}{4} \quad (3-16)$$

音響媒体と接する周長 L_r は次式から求められる。

$$L_r = 4L_s + \pi D_p \quad (3-17)$$

となり、平行な2平面へ近似する際の L_p は次式で表せる。

$$L_p = \frac{L_r}{2} = \frac{4L_s + \pi D_p}{2} \quad (3-18)$$

音響媒体の断面積を同一とするため、2平面間のすきま量 b_p は次式から求められる。

$$b_p = \frac{S_p}{L_p} \quad (3-19)$$

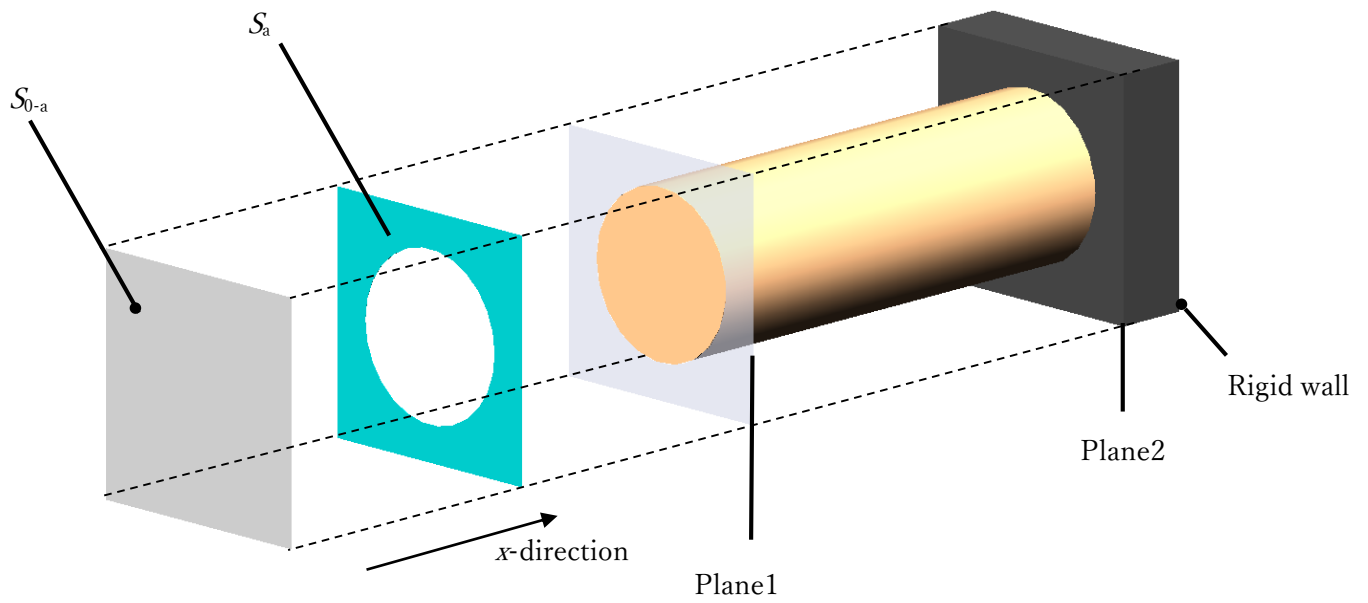


図 3-2 任意の構造の例

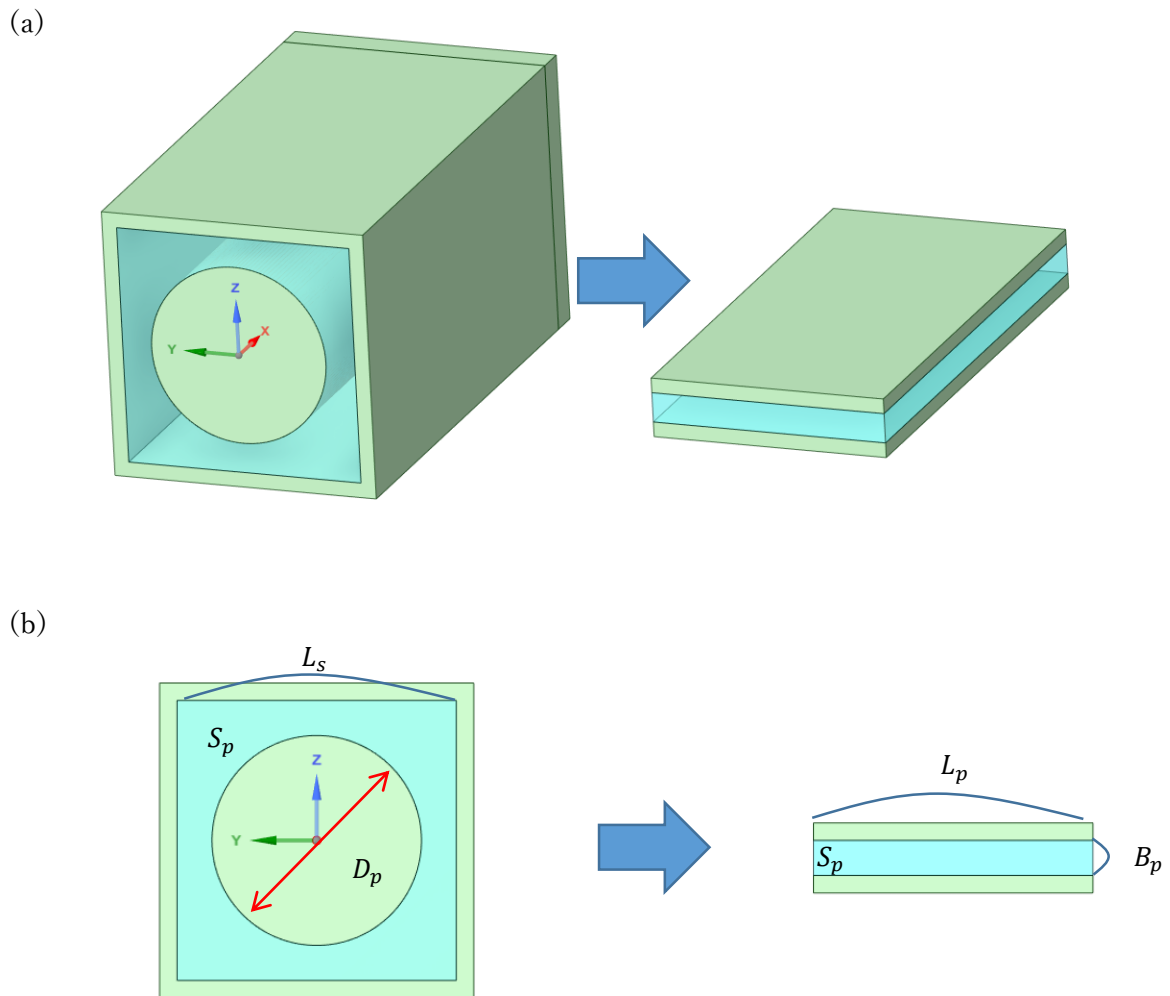


図 3-3 任意の断面における平行な 2 平面への近似例

3.5 平行な 2 平面間のすきまにおける特性インピーダンスと伝搬定数

前節までに任意の構造の吸音率を算出する為に，平行な 2 平面へ近似する手順を述べた．本節では，平行な 2 平面間のすきまを進行する音波における，特性インピーダンスと伝搬定数の算出について述べる．

音波がすきま内を進行する際には，粘性抵抗が発生し，音響エネルギーが熱エネルギーに変換される．細管内における音響減衰については，円管についての研究[4]や正三角形の管[4]，同心円状の管[5]，平行な 2 平面のすきま[4][6]についての研究がある．

本研究では, Stinson[4]の平行な2平面間のすきまによる方法を応用した. 図3-4の座標系において, x 方向が音波の入射方向である. 2平面間のすきまにおける伝搬定数 γ と特性インピーダンス Z_c は Navier-Stokes 方程式, 連続の式, 気体の状態方程式を近似を用いて解くことにより導出する. 空気は圧縮性流体とし, 空気の粘度は一定と仮定した.

平行な2平面間のすきまにおいて, 複素密度 $\rho(\omega)$ と複素圧縮率 $C(\omega)$ は以下の式で表される. また $C(\omega)$ は複素体積弾性率 $K(\omega)$ の逆数である.

$$\rho(\omega) = \frac{\rho_0}{B(s\sqrt{i})}, C(\omega) = \frac{1}{K(\omega)} = \frac{1}{\kappa P_s} \{ \kappa - (\kappa - 1)[B(s\sqrt{i}\sigma)] \} \quad (3-20)$$

$$B(x) = 1 - \frac{\tanh x}{x}, s = \frac{b}{2} \sqrt{\frac{\rho_0 \omega}{\mu}}$$

ここで, κ は比熱比(空気では1.403), σ はプラントル数, μ は粘度(空気では $1.869 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$), ω は角振動数, ρ_0 は密度(空気では 1.293kg/m^3), P_s は大気圧($1.013 \times 10^5 \text{Pa}$), i は虚数単位である.

伝搬定数 γ と比音響インピーダンス Z_c は以下の式で表される.

$$\gamma = i\omega \sqrt{\rho(\omega)C(\omega)}, \quad Z_c = \sqrt{\frac{\rho(\omega)}{C(\omega)}} \quad (3-21)$$

以上の事から, 2平面間のすきま量 b , 伝搬定数 γ と比音響インピーダンス Z_c との関係が示される.

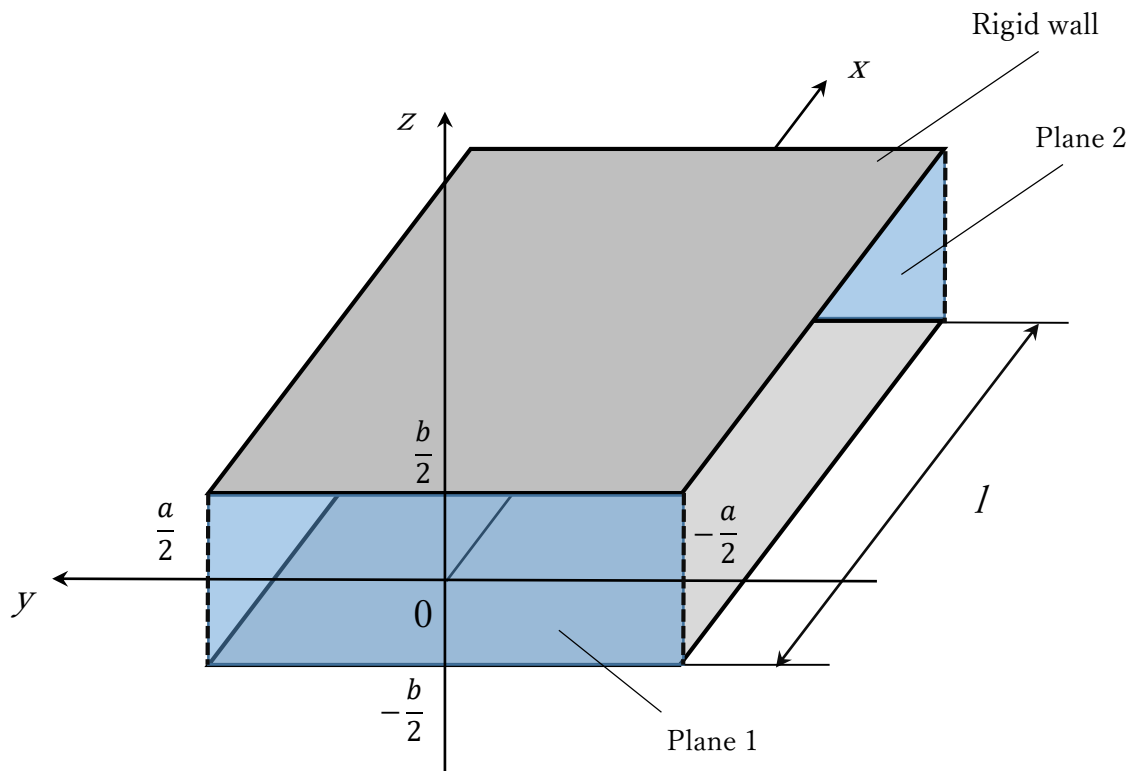


図 3-4 平行な 2 平面のすきまにおける直交座標系

3.6 伝達マトリックスの接続

本節では各種構造における吸音率を算出する過程で利用する伝達マトリックスの接続について述べる. 式(3-2)に示す伝達マトリックスは電気回路の 2 端子対回路として扱う事ができ, その中の F 行列に相当する[3]. 本研究では縦続接続と並列接続を利用する.

ここで式(3-2)を F 行列の一般的な表現にすると以下の式で表される.

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ Su_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & \frac{Z_c}{S} \sinh \gamma l \\ \frac{S}{Z_c} \sinh \gamma l & \cosh \gamma l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_2 \\ Su_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_2 \\ Su_2 \end{bmatrix} \quad (3-22)$$

以降に伝達マトリックスの接続について述べる[7].

3.6.1 縦続接続

縦続接続を行う対象の F 行列群を次式のように仮定する。

$$F_1 = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix}, F_2 = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix}, F_3 = \begin{bmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{bmatrix}, \dots, F_n = \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix} \quad (3-23)$$

接続後の行列を F_{all} とすると、以下の式で表される。

$$F_{all} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{all} & B_{all} \\ C_{all} & D_{all} \end{bmatrix} \quad (3-24)$$

3.6.2 並列接続

並列接続を行う F 行列群を式(3-23)と同様、次式のように仮定する。

$$F_1 = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix}, F_2 = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix}, F_3 = \begin{bmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{bmatrix}, \dots, F_n = \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix}$$

並列接続を行うには、行列を Y 行列に変換する。ここで、F 行列と Y 行列の関係は以下のように表される。

$$F = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{B} \begin{bmatrix} D & -|F| \\ -1 & A \end{bmatrix}, |F| = AD - BC \quad (3-25)$$

式(3-25)から、並列接続を行う F 行列群 $F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$ を Y 行列群 $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ に変換すると以下の式で表せる。

$$Y_1 = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}, Y_2 = \begin{bmatrix} Y_{21} & Y_{22} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}, Y_3 = \begin{bmatrix} Y_{31} & Y_{32} \\ Y_{31} & Y_{32} \end{bmatrix}, \dots, Y_n = \begin{bmatrix} Y_{n1} & Y_{n2} \\ Y_{n1} & Y_{n2} \end{bmatrix} \quad (3-26)$$

次に変換された Y 行列群を次式のように接続する.

$$Y_{all} = \begin{bmatrix} Y_{111} & Y_{112} \\ Y_{121} & Y_{122} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{211} & Y_{212} \\ Y_{221} & Y_{222} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{311} & Y_{312} \\ Y_{321} & Y_{322} \end{bmatrix} + \dots + \begin{bmatrix} Y_{n11} & Y_{n12} \\ Y_{n21} & Y_{n22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{a11} & Y_{a12} \\ Y_{a21} & Y_{a22} \end{bmatrix} \quad (3-27)$$

接続された Y 行列を F 行列へ変換する事で並列に接続した伝達マトリックスを求められる. 一般的な Y 行列からの F 行列への変換は, 以下のように表される.

$$F = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}, \quad F = \frac{-1}{Y_{21}} \begin{bmatrix} Y_{22} & 1 \\ |Y| & Y_{11} \end{bmatrix}, \quad |Y| = Y_{11}Y_{22} - Y_{12}Y_{21} \quad (3-28)$$

この関係から, 並列接続された伝達マトリックス F_{all} は次式から求められる.

$$F_{all} = \begin{bmatrix} A_{all} & B_{all} \\ C_{all} & D_{all} \end{bmatrix}, \quad Y_{all} = \begin{bmatrix} Y_{a11} & Y_{a12} \\ Y_{a21} & Y_{a22} \end{bmatrix}, \quad (3-29)$$

$$F_{all} = \frac{-1}{Y_{a21}} \begin{bmatrix} Y_{a22} & 1 \\ |Y_{all}| & Y_{a11} \end{bmatrix}, \quad |Y_{all}| = Y_{a11}Y_{a22} - Y_{a12}Y_{a21}$$

3.7 参考文献

- [1] 笹尾博行, “Excel による音響解析入門 -音響構造特性の解析-(1) 音響解析と Excel 利用の基礎事項,” 空気調和・衛生工学, 第 80 巻, 第 9 号, pp. 779-789, 2006.
- [2] 笹尾博行, “Excel による音響解析入門 -音響構造特性の解析-(4) Excel によるダクト系消音器の解析,” 空気調和・衛生工学, 第 81 巻, 第 1 号, pp. 51-58, 2007.
- [3] 加藤大輔, “音響管計測の原理と計測量,” 日本音響学会誌, 68 巻, 9 号, pp. 463-468, 2012.
- [4] Stinson, M. R. and Champoux, Y., “Propagation of sound and the assignment of shape factors in model porous materials having simple pore geometries,” Journal of the Acoustical Society of America, Vol 91, No.2, pp. 685-695, 1992.
- [5] Sakamoto, S., Nakano, A., Tanikawa, H., Maruyama, Y., “Estimation and experiment for sound absorption coefficient of cross-sectional shape of clearance by concentric cylinder,” Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 9, No. 3, Paper No. 15-00216, 13 pages, 2015.
- [6] Allard, J. F., Atalla, N., Sound Propagation in Porous Media, Wiley, pp. 45-54, 2009.
- [7] 中村福三, 電気回路基礎論, 朝倉書店, pp. 85-94, 1999.

第4章 剣山状構造

4.1 緒言

本章では、円柱が規則的に配置して構成される剣山状構造について吸音特性を推定する理論解析を試み、数理モデルを構築する。フレーム構造には剣山状の領域が存在する為、剣山状構造はフレーム構造を構成する基本構造となる[1]。剣山状構造では円柱間のすきまによって吸音効果を見込めるが、音波の入射側から見た空隙部の断面は単純な幾何形状ではないため、吸音特性を推定する為には任意の断面形状を考慮する必要がある。

剣山状構造は円柱を規則的に配置しており、音波の入射側から空隙部を見ると、代表的な断面形状が規則的に配置されている。それらの代表的な空隙断面を平行な2平面へ近似し、各断面の伝達マトリックスを求め、それらを接続する事で吸音率を推定する[2][3]。

吸音率について実験結果と理論解析結果を比較し、構築した数理モデルの有用性を示す。

剣山状構造はヒートシンクで用いられる代表的な構造であり[4][5]、伝熱機能を主目的とするが、騒音対策の視点でその効果を予測する事は有用である。

4.2 試料

本検討で用いた試料の構造について図4-1に示す。試料は2.2節で説明した音響管内に配置される。音響管内の直径は29mmであり、図4-2のようにアルミ合金製のホルダーに1辺25.7mmの矩形空洞を作成し、試料を取り付けた。

試料はFormlabs製の3DプリンタForm2を使用し、純正の光硬化性樹脂を用いて製作した。試料と試料ホルダーのすきまはワセリンで充填した。

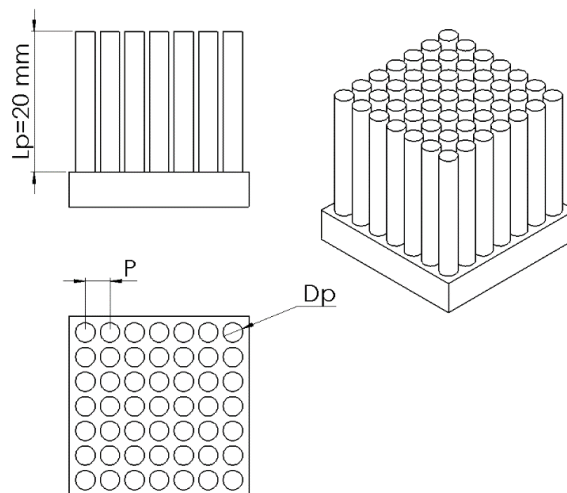


図4-1 試料の概略図

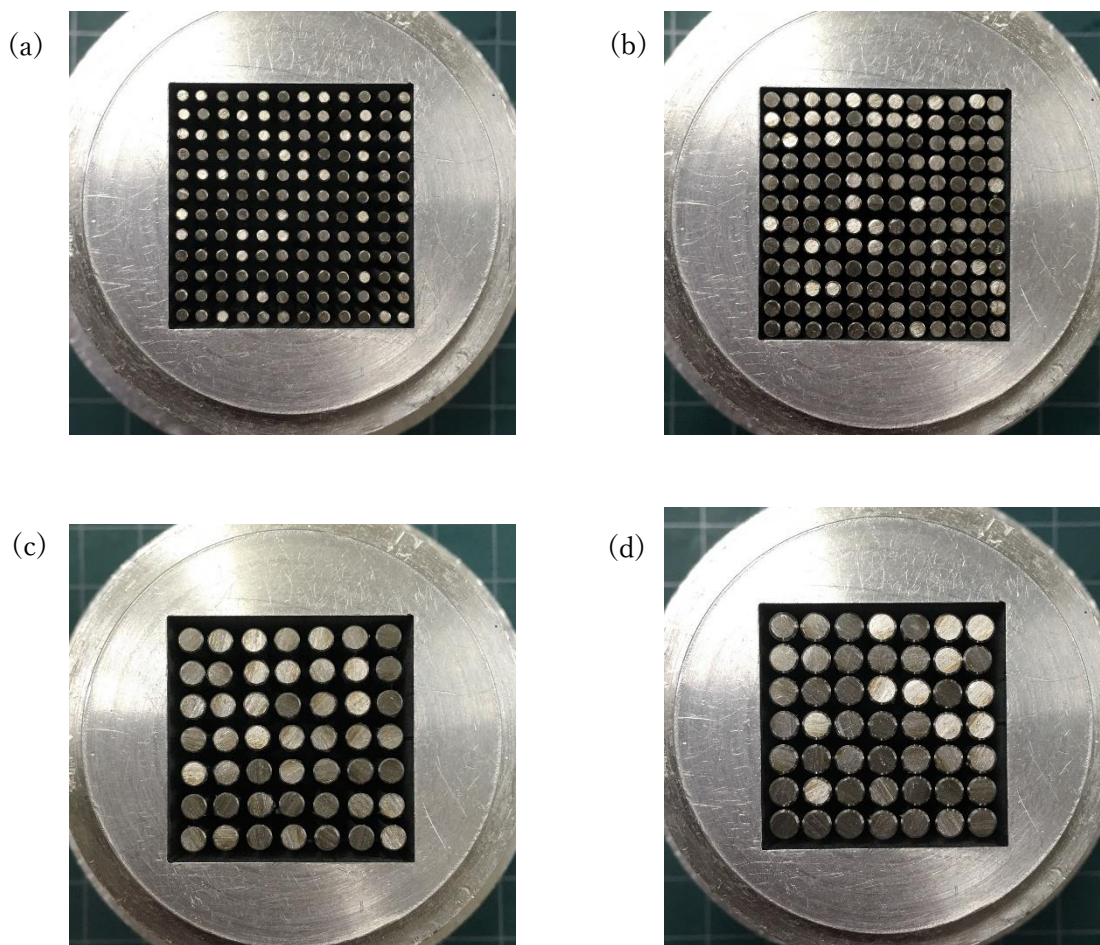


図 4-2 音響管に取り付けたホルダーと試料

本検討では、図 4-1 に示す試料の円柱の直径 D_p 、ピッチ P を変化させた。円柱の長さは 20mm とした。使用した試料の詳細を表 4-1 に示す。

表 4-1 試料の諸元

円柱部直径 D_p [mm]	円柱間ピッチ P [mm]	円柱部長さ L_p [mm]	円柱の数 N_p	図 4-2 との関係
1.3	2.1	20	144	(a)
1.7				(b)
2.7	3.5		49	(c)
3.1				(d)

4.3 平行な2平面への近似

音波が任意の空隙断面を進行する場合の吸音特性を推定する為には空隙部を平行な2平面へ近似する。図4-3は音波の入射側から見た試料の概略図である。剣山状構造の場合、図4-4に示すような3種類の領域で構成されており、4本の円柱で囲まれた領域を解析ユニットA(図4-4(a))、2本の円柱と1面の平面で囲まれた領域を解析ユニットB(図4-4(b))、1本の円柱と2面の平面で囲まれた領域を解析ユニットC(図4-4(c))とする。吸音率を推定する為に、各解析ユニットを図4-4(d)のように平行な2平面へ近似する。

剣山状構造では音波の入射側から見た空隙部(音響媒体部)の断面積が一様である。このような構造を平行な2平面へ近似する為に、空隙と接触する壁面の縁長さと空隙部の断面積を利用する。解析ユニットA, B, Cにおける2平面のすきま幅を L_A , L_B , L_C とすると、次式から求められる。ここで D_p は円柱の直径、 P は円柱間ピッチ、 L_s は試料1辺の長さ、 N_p は円柱の数である。

$$\begin{aligned} L_A &= \frac{\pi D_p}{2} \\ L_B &= \frac{\pi D_p/2 + P}{2} \\ L_C &= \frac{\pi D_p + \{L_s - P(\sqrt{N_p} - 1)\}}{2} \end{aligned} \quad (4-1)$$

同様に、各解析ユニットの空隙部の断面積を S_A , S_B , S_C とすると、次式より求められる。

$$\begin{aligned} S_A &= P^2 - \frac{\pi D_p^2}{4} \\ S_B &= P \left\{ \frac{L_s - P(\sqrt{N_p} - 1)}{2} \right\} - \frac{\pi D_p^2}{8} \\ S_C &= \left\{ \frac{L_s - P(\sqrt{N_p} - 1)}{2} \right\}^2 - \frac{\pi D_p^2}{16} \end{aligned} \quad (4-2)$$

これらの値から、近似された2平面間のすきま量は次式から求められる。

$$b_A = \frac{S_A}{L_A}, b_B = \frac{S_B}{L_B}, b_C = \frac{S_C}{L_C} \quad (4-3)$$

式(4-3)で求めたすきま量と式(3-20), (3-21)によって伝搬定数と特性インピーダンスを求め, それらを式(3-2)にあてはめる事で各解析ユニットの伝達マトリックスを求める.

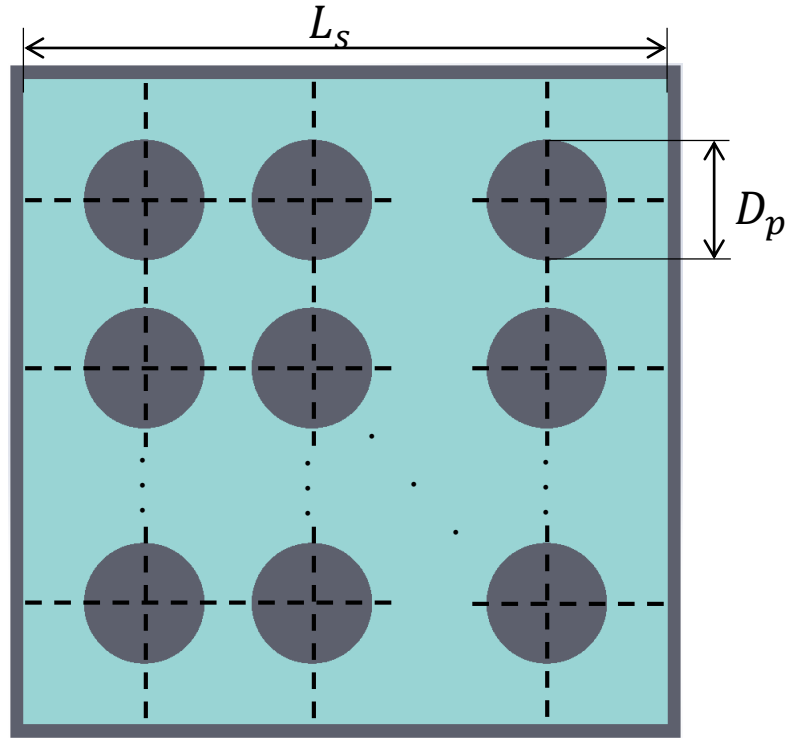


図 4-3 音波の入射側から見た試料の概略図と領域の分割

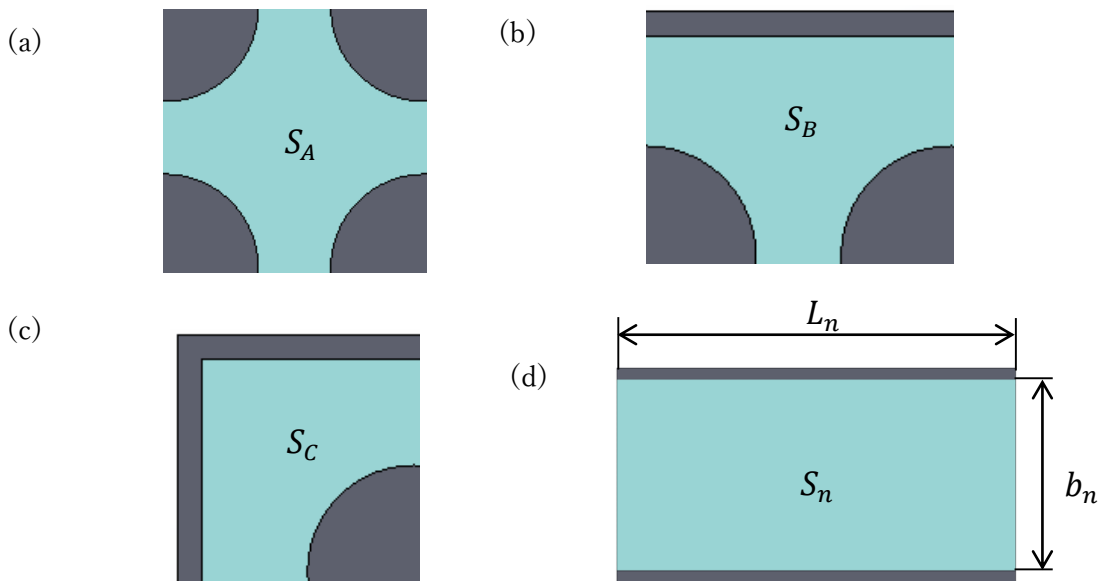


図 4-4 分割した各領域と近似した平行な 2 平面

(a)解析ユニット A, (b)解析ユニット B, (c)解析ユニット C, (d)近似した平行な 2 平面

4.4 伝達マトリックスの算出

本節では前節で求めた各解析ユニットの伝達マトリックスから試料全体の伝達マトリックスを求める。

4.4.1 y軸方向1層の伝達マトリックス

解析ユニット A, B, C の伝達マトリックスを T_A , T_B , T_C とする。

試料全体の伝達マトリックスを求める為に、段階的に伝達マトリックスを接続する。図 4-5 に示すように、最初に y 軸方向の伝達マトリックス T_M , T_N を求める。

T_M , T_N を算出する為、図 4-6 に示すように T_A , T_B , T_C を並列に接続する。

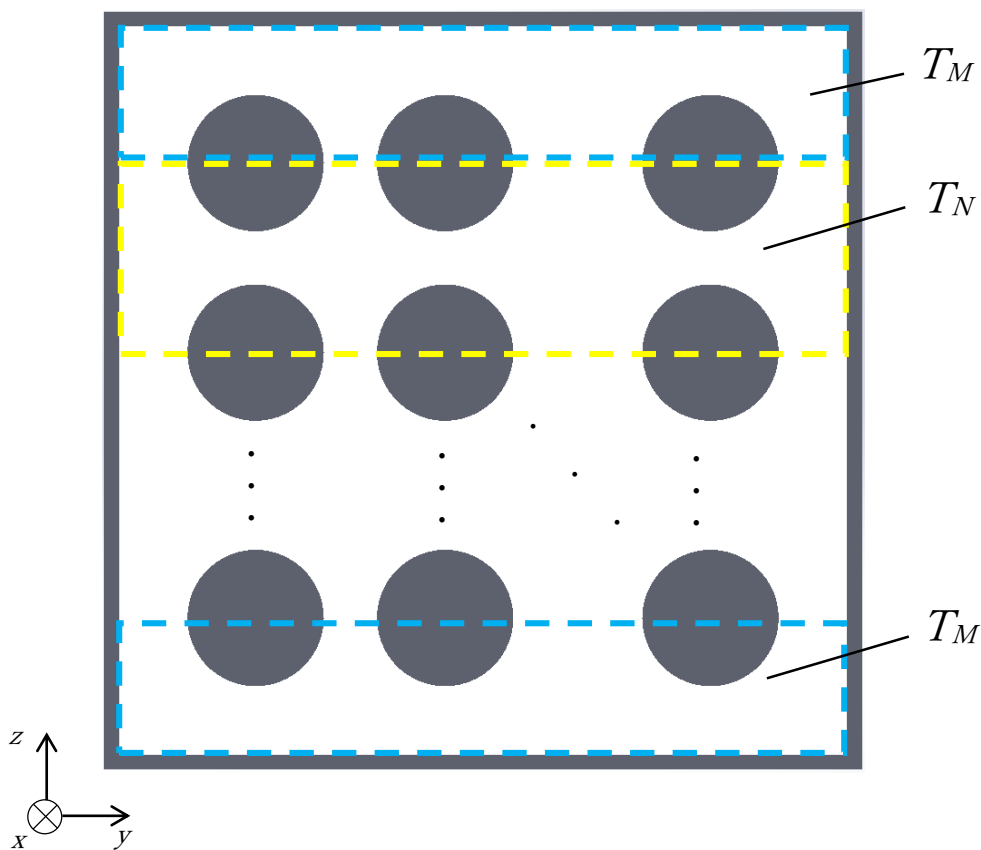


図 4-5 試料のモデル図

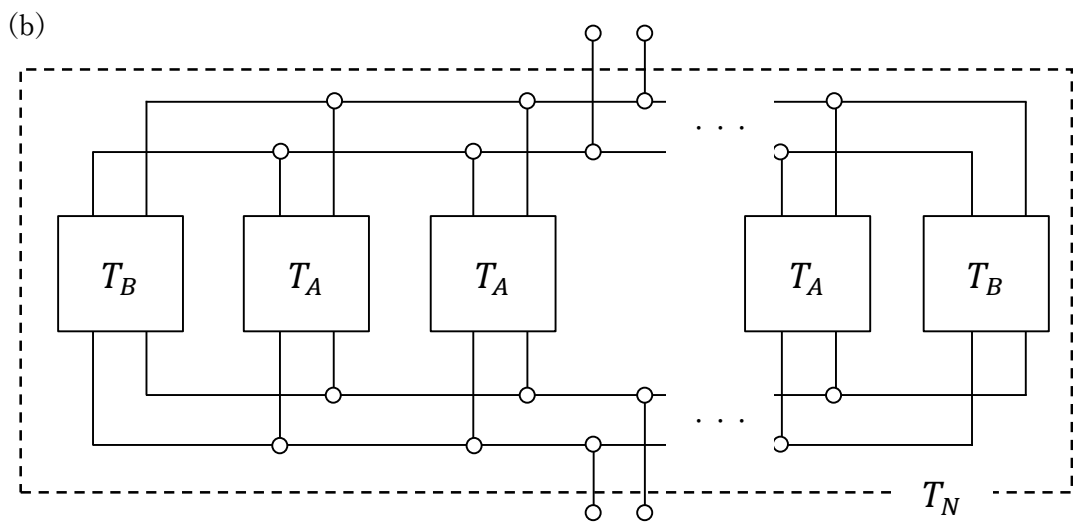
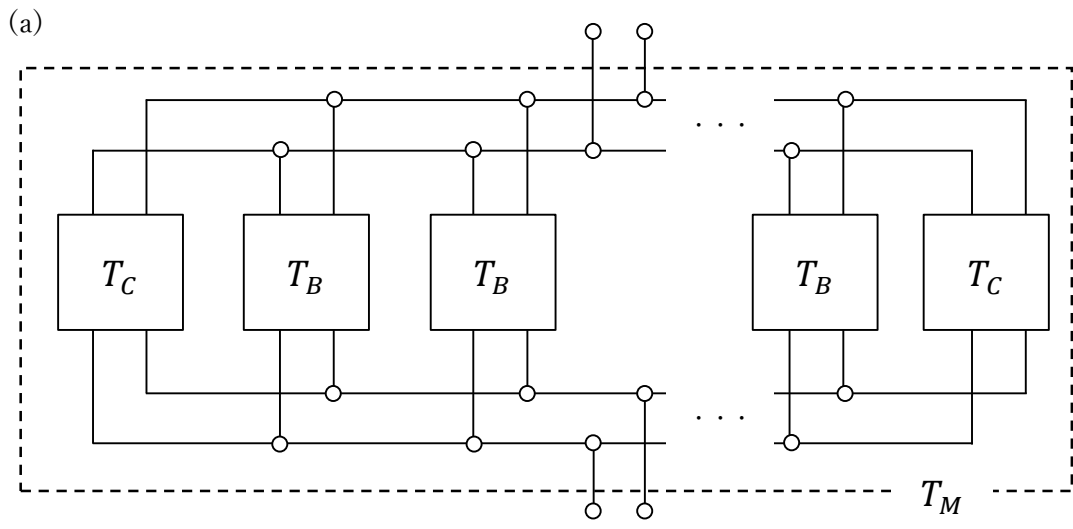


図4-6 y軸方向1層の等価回路
 (a) T_B , T_C の並列接続 T_M , (b) T_A , T_B の並列接続 T_N

4.4.2 試料全体の伝達マトリックス

前項で求めた y 軸方向 1 層の伝達マトリックス T_M , T_N を用いて, 試料全体の伝達マトリックスを算出する. 図 4-7 に示すように T_M , T_N を並列に接続し, 試料全体の伝達マトリックス T_{all} を求める.

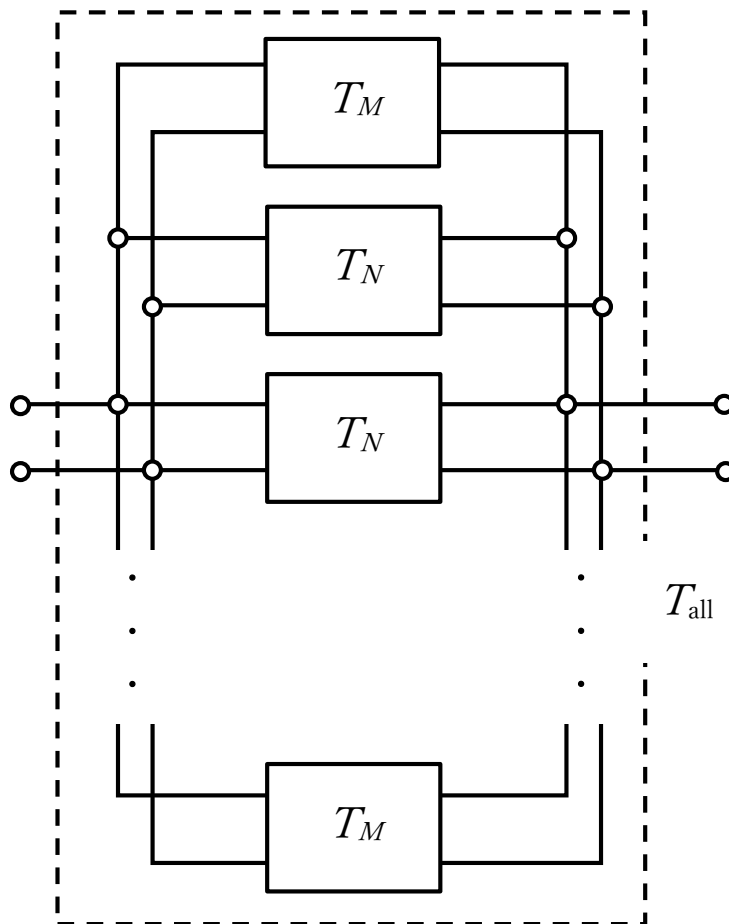


図 4-7 試料全体の等価回路(T_M , T_N の並列接続)

4.5 吸音率の算出

前項で求めた試料全体の伝達マトリックス T_{all} から吸音率を算出する. 吸音率の算出については 3.3 節と同様であり, 式(3-10), (3-13), (3-14), (3-15)から比音響インピーダンス Z_0 , 反射率 R を求め, 吸音率 α を求める.

4.6 実験結果

本節では各試料における吸音率について実験結果と数理モデルによる理論解析の比較を行う。

図4-8にピッチ2.1mmの試料における実験結果と理論解析結果を示す。実験結果では線径 $D_p=1.3$ mmの試料が約4600 Hz付近で約0.19、線径 $D_p=1.7$ mmの試料が約4350 Hz付近で約0.38の吸音率のピークが現れている。解析結果としては線径 $D_p=1.3$ mmでは約4850 Hz付近で約0.16、線径 $D_p=1.7$ mmでは約4400 Hz付近で約0.35の吸音率のピークが現れている。

図4-9にピッチが3.5 mmの試料に関する実験結果と理論解析結果を示す。実験結果では線径 $D_p=2.7$ mmの試料が約4500 Hz付近で約0.19、線径 $D_p=3.1$ mmの試料が約4350 Hz付近で約0.35の吸音率のピークが現れている。解析結果としては線径 $D_p=2.7$ mmでは約4550 Hz付近で約0.18、線径 $D_p=3.1$ mmでは約4350 Hz付近で約0.31の吸音率のピークが現れている。

いずれの試料においても、吸音率の周波数特性では実験結果と理論解析結果は近い傾向を示している。特に吸音率のピークを示す周波数は精度良く推定された。吸音率の値は解析結果が実験結果よりも低くなる傾向だが、試料間の定性的な関係は一致した。

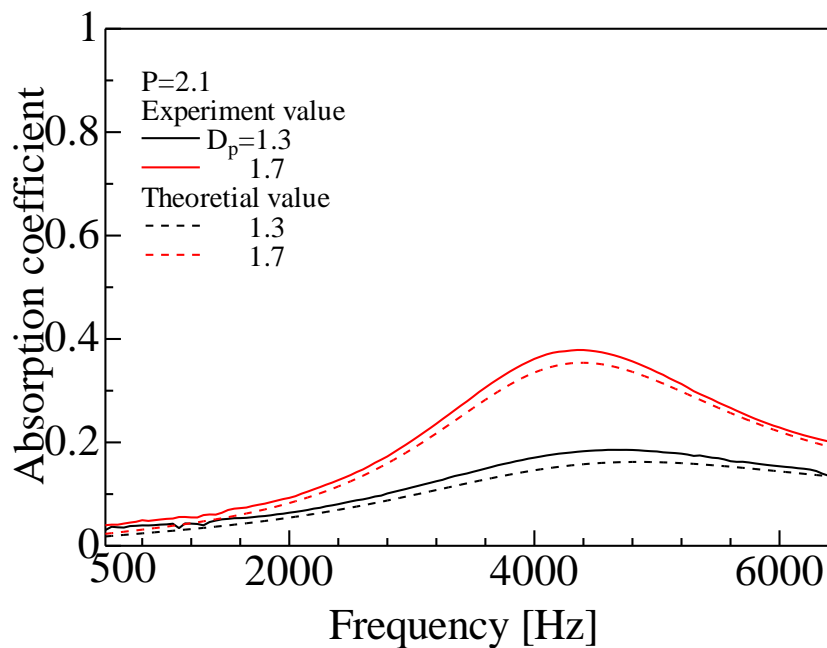


図4-8 ピッチ2.1mmの試料における実験結果と理論解析結果

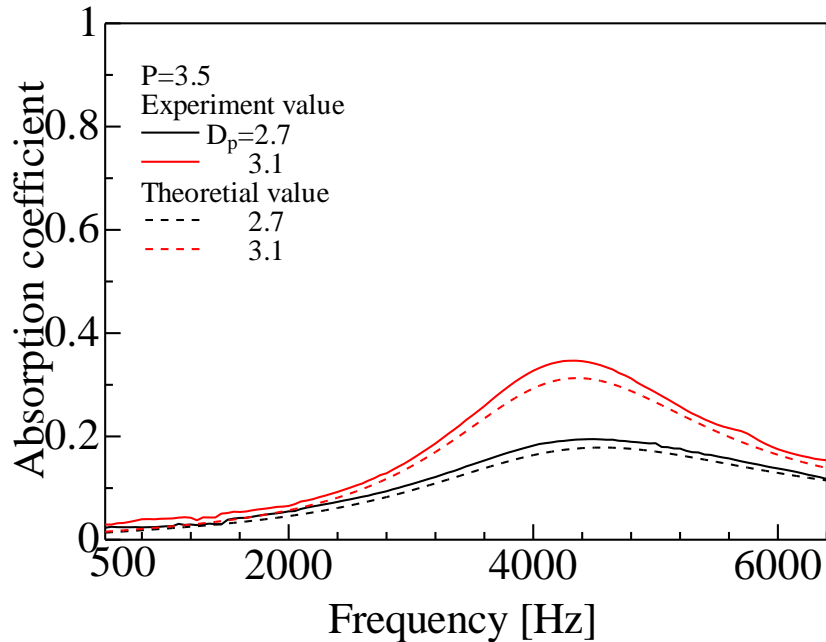


図4-9 ピッチ 3.5mm の試料における実験結果と理論解析結果

4.7 パラメータスタディ

前節では構築した数理モデルが剣山状構造の吸音特性を推定できる事を示した。本節では構築した数理モデルによって理論解析を行い、剣山状構造について実際の試料とは異なる寸法の吸音特性を評価する。

図4-10は剣山状構造について円柱の直径、本数、ピッチを固定し円柱の長さを変化させた場合の解析結果を示したものである。円柱を長くする事で吸音率のピークとなる周波数が低くなると共に吸音率のピーク値も上がる傾向である。この傾向は一般的な吸音材でも確認される[6]。

図4-11は円柱の本数、ピッチ、長さを固定して円柱の直径を変化させた場合の解析結果を示したものである。円柱の直径を増加させる事で吸音率のピーク値が上昇する。これは円柱間の隙間量が小さくなる事で粘性抵抗が増加し、音波を減衰する効果が増大する為である。

前節では解析結果は実験結果に比べ吸音率が低くなる傾向が確認された。上記の事から、推定精度を向上させる手段として円柱の直径を実際より大きめに設定して利用する事も考えられる。

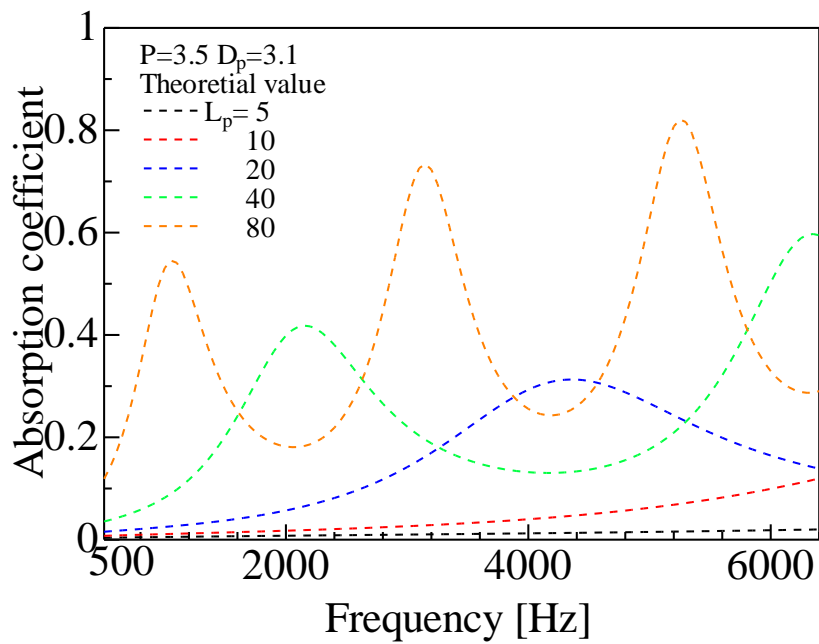


図 4 - 10 円柱の長さを変化させた場合の理論解析
 ($D_p = 3.1\text{mm}$, $P = 3.5\text{mm}$, $L_p = 5, 10, 20, 40, 80\text{mm}$)

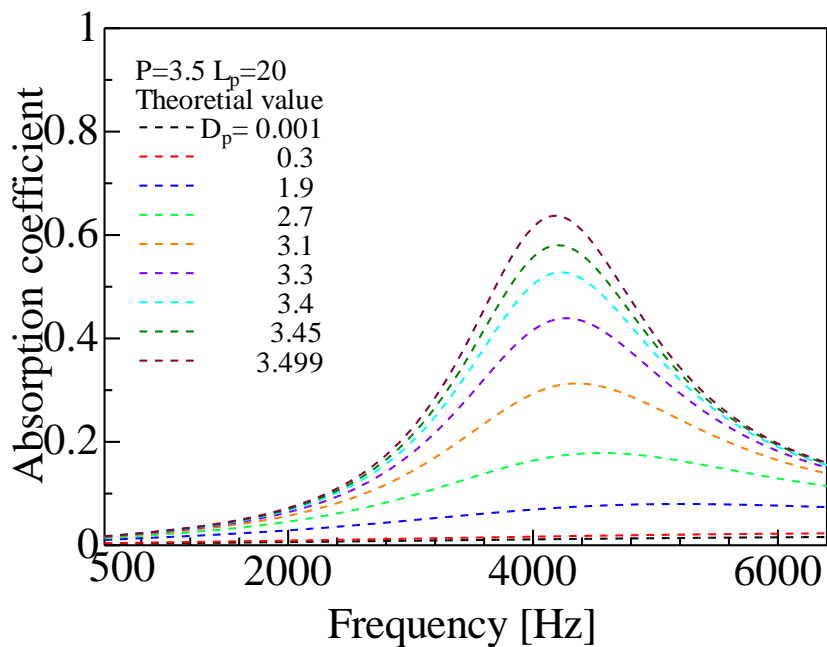


図 4 - 11 円柱の直径を変化させた場合の理論解析
 ($P = 3.5\text{mm}$, $L_p = 20\text{mm}$, $D_p = 0\sim 3.499\text{mm}$)

4.8 結言

円柱が規則的に配置された剣山状構造において、寸法と空気の物性から吸音特性を推定する数理モデルを構築した。

数理モデルを構築するにあたり、空隙部のすきまで発生する音波の減衰作用を考慮した。音波の入射側から見た空隙部の断面について、3種類の代表領域に分割した。それらの領域を平行な2平面へ近似する事で伝達マトリックスを算出した。求めた伝達マトリックスを並列に接続する事で試料全体の伝達マトリックスを求め、吸音率を推定した。

吸音率について実験結果と数理モデルによる解析結果を比較すると、全体的な周波数特性として両者は近い傾向を示した。吸音率のピークを示す周波数については解析結果と実験結果で精度良く推定された。吸音率の値は解析結果が実験結果よりも低くなるが、試料間の定性的な関係は一致し、数理モデルの有用性を確認できた。

構築した数理モデルを用いて剣山状構造の寸法を変え、2通りのパラメータスタディを行った。1つは円柱の長さを変化させた場合、2つ目は円柱の直径を変化させた場合である。

円柱の長さを変化させた場合は、円柱を長くすると吸音率のピーク値は増加し、ピークを示す周波数は低くなる結果となった。この傾向は一般的な吸音材に見られる。

円柱の直径を変化させた場合は、直径の増加に伴い吸音率が増加する結果となった。これは円柱間のすきま量が狭くなり、音波の減衰効果が増加する事を示唆している。

4.9 参考文献

- [1] 赤嶺孝太, 坂本秀一, 佐藤隆政, 宇内俊介, 磯部卓功, フォーム吸音材に関する基礎的研究 (ラーメン構造の吸音率の理論的推定と実験), 日本機械学会北陸信越支部 第56期総会・講演会講演論文集, No. 197-1, Paper No. K012 (2019. 3. 2), 富山大, 4 pages.
- [2] Takamasa Satoh, Shuichi Sakamoto, Isami Nitta, Kota Akamine, Shunsuke Unai, Takunari Isobe, Kenta Iizuka, Experiment and estimation of the sound absorption coefficient of a pin holder structure, Proceedings of INTER-NOISE 2020 (49th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering), Seoul, Korea, Paper No. 982, 10 pages, 23-26 August 2020.
- [3] Takamasa SATOH, Shuichi SAKAMOTO, Kohta AKAMINE, Shunsuke UNAI, Takunari ISOBE and Kenta IIZUKA, "Study and estimation of sound absorption coefficient of pin holder structure," Noise Control Engineering Journal, Vol.69 No.2, pp. 102-111, 2021.

- [4] Siwadol K., Sungkom S., Sujin B., “Optimal Geometrical Design of Multiple Heights Pin-Fin Heat Sink Using MOPBIL,” The 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand, Paper No. CTS-018272, 7 pages, 2009.
- [5] Ko-Ta C., Fu-Ping C., “Application of response surface methodology in the parametric optimization of a pin-fin type heat sink,” International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol.33, pp. 836-845, 2006.
- [6] 子安勝, “吸音材料の歴史と展望,” 音響技術, No. 24, pp.1-5, 1978.

第5章 剣山状構造の円柱に垂直な方向から音波が入射した場合

5.1 緒言

第4章では音波の入射方向に対する空隙部の断面が一様な構造として、剣山状構造の吸音特性を推定する数理モデルを構築した。本章では剣山状構造において音波が円柱軸に対し垂直な方向から入射する場合を対象とする[1]。剣山状構造における音波の入射方向の差異は吸音特性を推定する上で明確な違いがある。それは音波の入射方向に対し、空隙部の断面が変化する点である。

本章では上記の断面変化を考慮した吸音特性を推定する理論解析を試み、数理モデルを構築する。円柱で構成される剣山状試料を横に倒すような形態で吸音特性を評価した。フレーム構造を考える場合、音波の入射方向に対して断面が変化する領域が想定される為、本検討により断面変化を考慮する数理モデルの骨子とする[2][3][4]。

はじめに、試料の形状、音波の入射方向について述べ、音波入射方向に対し断面が変化する構造について吸音特性を推定する数理モデルの内容を示す。吸音率について実験結果と解析結果の比較を行い、数理モデルの有用性を示す。

第4章の場合と同様、剣山状構造はヒートシンクで用いられる代表的な構造であり、伝熱機能の他に音響特性という側面も考慮する事で電子部品などの騒音対策に有用である[5][6]。

5.2 試料

図5-1に測定の際に用いた試料の概略図、図5-2に試料の写真を、表5-1に試料の諸元をそれぞれ示す。試料はFormlabs製の3DプリンタのForm2を使用し、光硬化性樹脂を用いて製作した。試料における円柱の長さは25.7 mmとし、直径とピッチを変化させた場合の吸音率へ及ぼす影響を比較した。

図5-2に示すように、測定に用いた試料は一辺が25.7 mmのアルミ合金製の試料ホルダーに挿入し吸音率の測定を行った。試料以外に吸音へ寄与する要因を排するため、試料ホルダーと試料の土台の隙間はワセリンで充填した。

試料は3Dプリンタで製作したため、円柱の直径に若干のばらつきが見られた。そのため、試料の平均直径を求め、その値を理論解析に用いた。平均直径を求めるにはマイクロメータを用いた。全ての円柱棒について先端付近、中間、根本付近の3か所の直径をそれぞれ測定し、それらの平均を平均直径とした。各試料における平均直径は表5-1に示す。

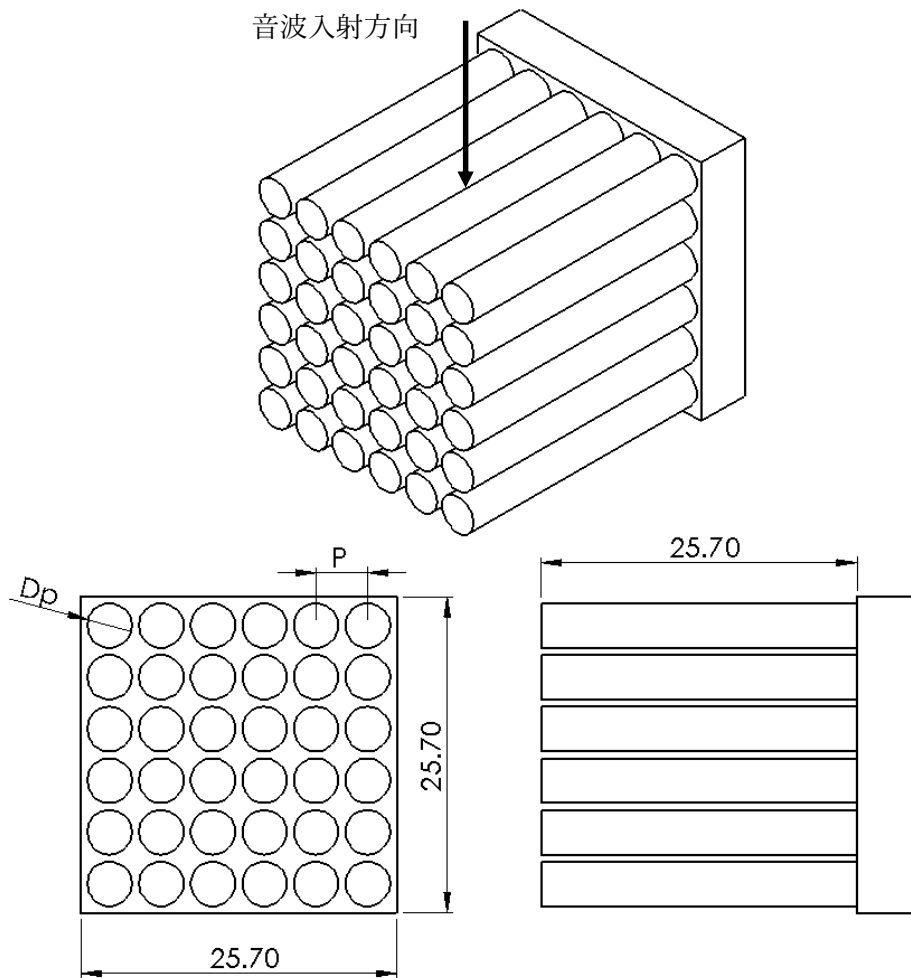


図 5 -1 試料の概略図



(a) $D_p = 2.9$ mm, $P = 3.5$ mm,
 $N_p = 49$



(b) $D_p = 3.1$ mm, $P = 3.5$ mm,
 $N_p = 49$



(c) $D_p = 3.6$ mm, $P = 4.2$ mm,
 $N_p = 36$



(d) $D_p = 3.8$ mm, $P = 4.2$ mm,
 $N_p = 36$

図 5-2 音響管に取り付けたホルダーと試料

表 5-1 試料の諸元

円柱直径 D_p [mm]	円柱間 ピッチ P [mm]	円柱長さ [mm]	円柱の数 N_p	円柱層 の数	円柱の 平均直径 [mm]	図 5-2 との 関係
2.9	3.5	25.7	49	7	2.89	(a)
3.1					3.13	(b)
3.6	4.2		36	6	3.53	(c)
3.8					3.74	(d)

5.3 解析ユニットにおける平行な2平面への近似

5.3.1 2本の円柱間における解析ユニット

本章で扱う試料は横向きの剣山状構造であり、円柱が規則的に配置された繰り返し構造である。本項では2本の円柱に囲まれた空隙部について扱う。図5-3は試料における2本の円柱に関するモデル図である。図5-3に示す赤枠部分に着目すると、音波は2本の円柱に囲まれたすきまを進行する事となる。この部分を解析ユニットIとする。

2本の円柱の間はすきまとして捉えられ、音波の減衰効果が作用する。第4章では円柱間のすきまを平行な2平面へ近似した。本章でも平行な2平面へ近似するが、断面の変化を考慮する為、第4章と内容が異なる。

図5-4に示すように解析ユニットIを音波入射方向(x方向)に分割する。分割数はn層とし、各層の厚みは均一とする。円柱の直径は D_p である為、一層分の厚みは D_p/n となる。実際の分割数は100分割とした。これは理論値が十分に収束する分割数である。

分割した各層において、平行な2平面へ近似する。3次元的な構造を2平面へ近似する為に、解析ユニットIの空隙部の体積と、空隙部が接する円柱部や壁面との接触面積が平行な2平面のそれらと等しくなるよう、すきま幅とすきま量を求める。

図5-5に解析ユニットIの任意の層を平行な2平面へ近似する例を示す。片側の円柱が構成する接触面の面積を S_1 、また試料ホルダーの内壁が構成する片側の接触面の面積を S_2 とする。

図5-6に示すように、 S_1 を構成する円弧の中心角 θ_n は次式となる。

$$\theta_n = \cos^{-1} \left\{ 1 - \left(\frac{x}{r} + \frac{D_p}{nr} \right) \right\} - \cos^{-1} \left(1 - \frac{x}{r} \right) \quad (5-1)$$

ここで、 r は円柱の半径である。円柱の長さが L_p であるので、 S_1 は次式で表せる。

$$S_1 = r\theta_n \times L_p \quad (5-2)$$

試料ホルダーが構成する S_2 については、円柱間ピッチと層の厚みで構成する長方形の面積から、図5-7の赤枠の面積を引いたものとなる。赤枠の1つ分の面積を A_{ar} とすると、 A_{ar} の面積は次式となる。

$$A_{ar} = \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{r^2 - x^2} dx \quad (5-3)$$

求めた A_{ar} により S_2 は次式から求められる.

$$S_2 = P \times \frac{D_p}{n} - 2A_{ar} \quad (5-4)$$

同様に空隙部の体積 V は次式で表せる.

$$V = S_2 \times L_p \quad (5-5)$$

図 5-5 に示すように, 空隙部の体積 V や接触面積 S_1, S_2 は近似した 2 平面のすきまでも同様となるため, すきま量は次式から求められる.

$$b = \frac{V}{S_1 + S_2} \quad (5-6)$$

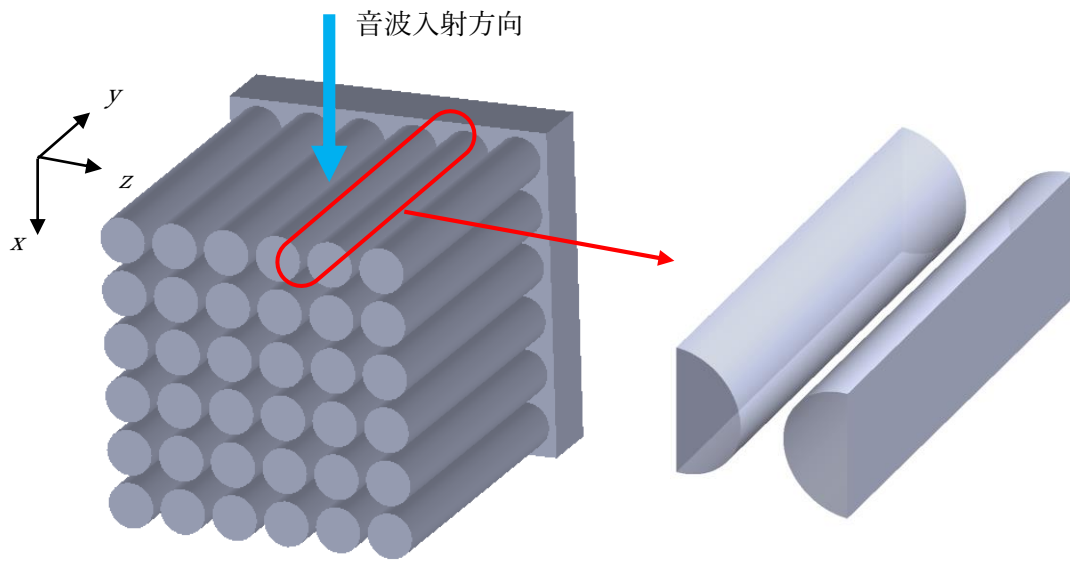


図 5-3 試料のモデル図と解析ユニット I

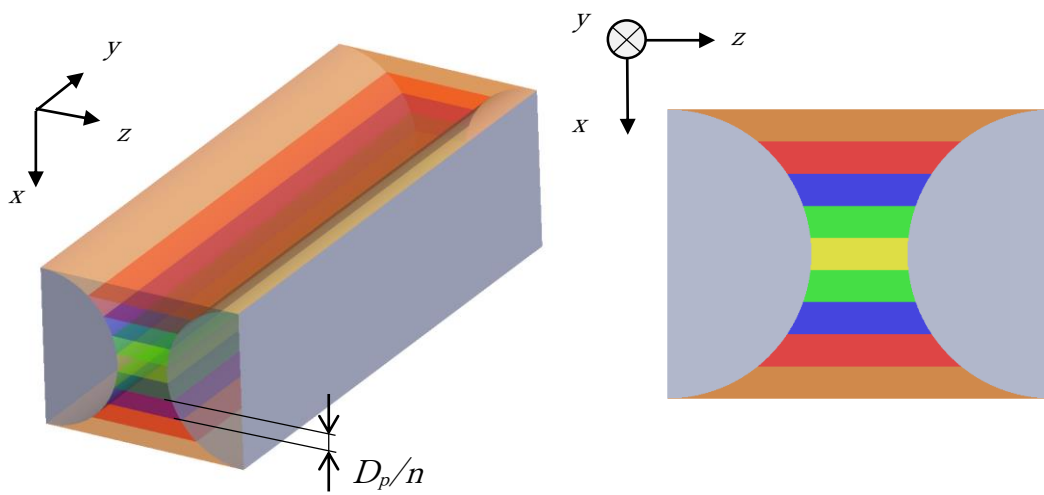


図 5-4 x 方向へ n 層に分割した解析ユニット I

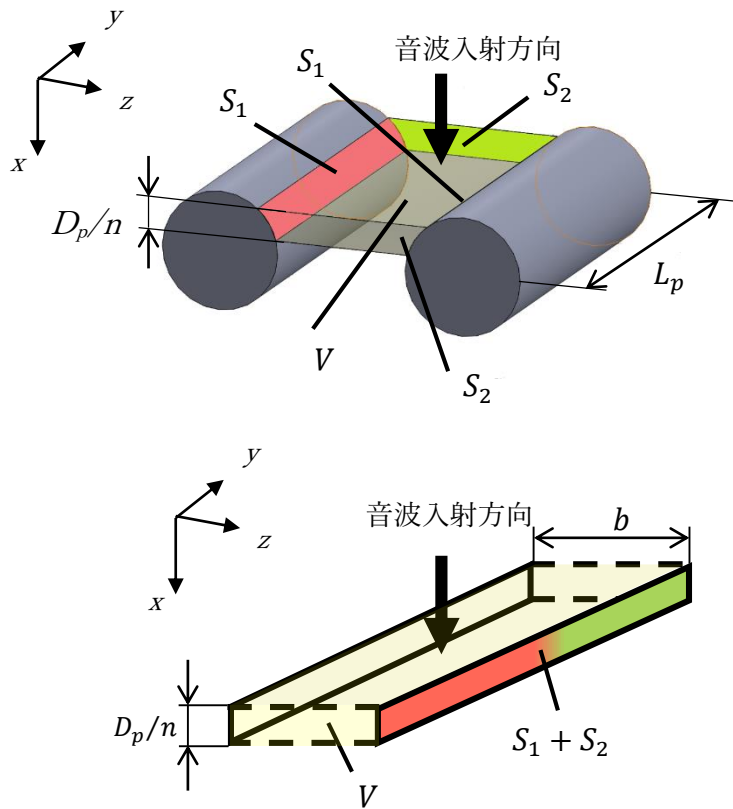


図 5-5 解析ユニット I の分割層における平行な 2 平面への近似例

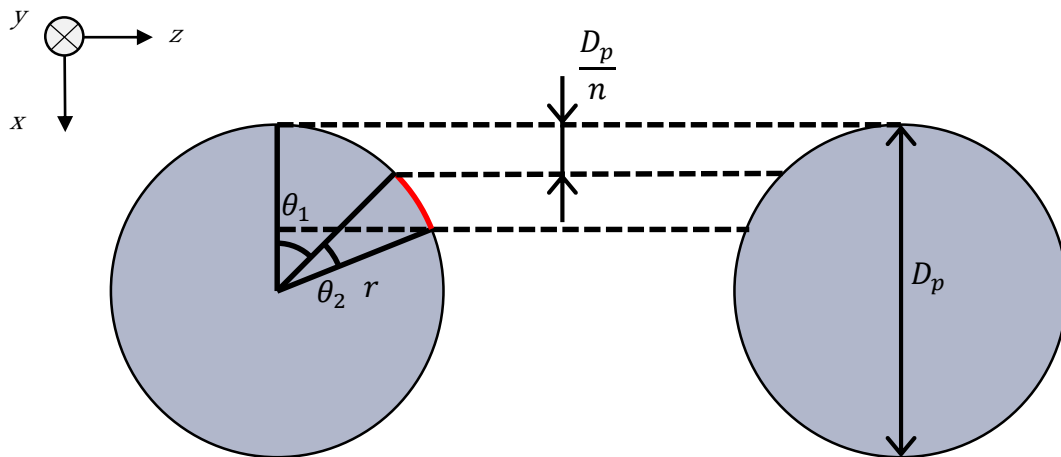


図 5-6 接触面積 S_1 を構成する円弧

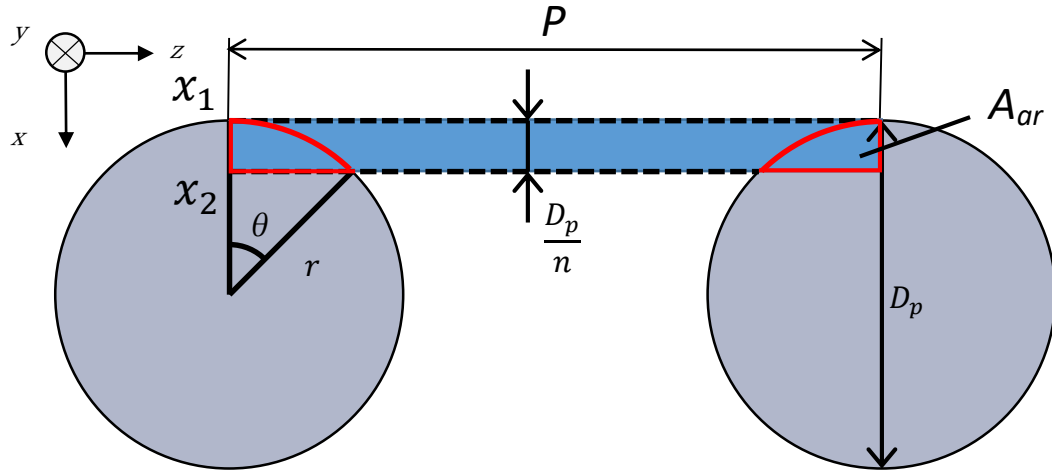


図 5-7 試料ホルダーが構成する接触面

5.3.2 円柱 1 本と試料ホルダー内壁に囲まれた解析ユニット

本検討で扱う試料とその周辺は前項で算出した 2 本の円柱間の空隙部のほか、端部において、円柱と試料ホルダーに囲まれた領域が存在する。図 5-8 に示すモデル図において赤枠の領域を解析ユニット II とし、解析ユニット I と同様に音波入射方向へ n 層に分割する。

図 5-9 に解析ユニット II の分割層における平行な 2 平面への近似例を示す。円柱と接触する面積 S_1 は解析ユニット I と同様となる。 y 軸に垂直な壁面の面積 S_2' は次式で表せる。ここで L_t は試料ホルダーの 1 辺の長さであり、 $L_t = 25.7\text{mm}$ である。

$$S_2' = \frac{L_t - (\sqrt{N_p} - 1)P}{2} \frac{D_p}{n} - A_{ar} \quad (5-7)$$

求めた S_2' から空隙部の体積 V' は次式から求められる。

$$V' = S_2' \times L_p \quad (5-8)$$

z 軸に垂直な壁面の面積 S_3 は次式で表せる。

$$S_3 = \frac{D_p}{n} \times L_p \quad (5-9)$$

求めた V' , S_1 , S_2' , S_3 から, 2平面間のすきま量 b は次式によって求められる。

$$b = \frac{V'}{\frac{(S_1 + 2S_2' + S_3)}{2}} \quad (5-10)$$

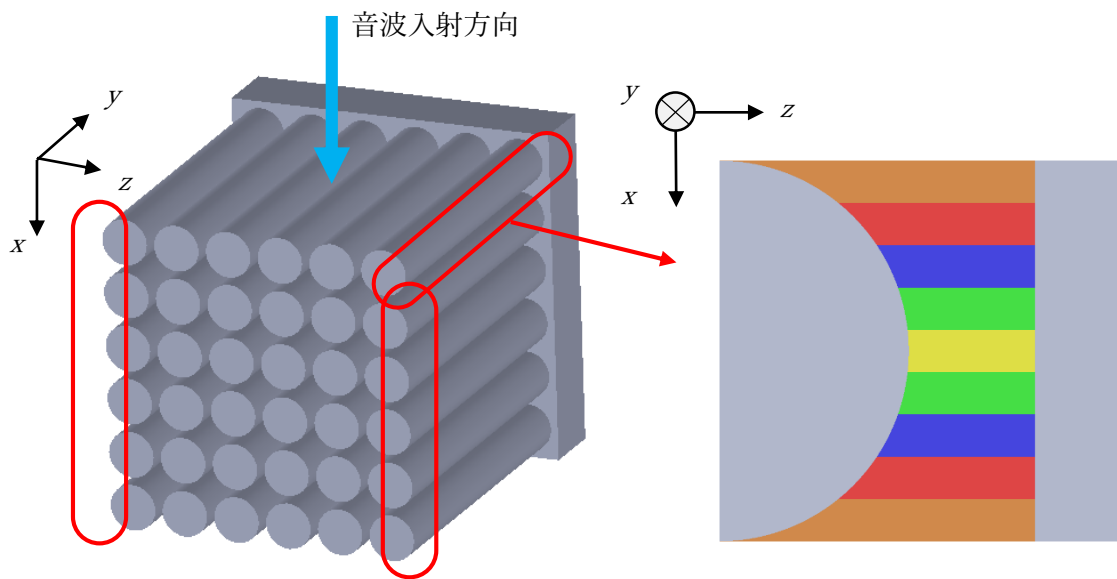


図5-8 解析ユニットIIのモデル図

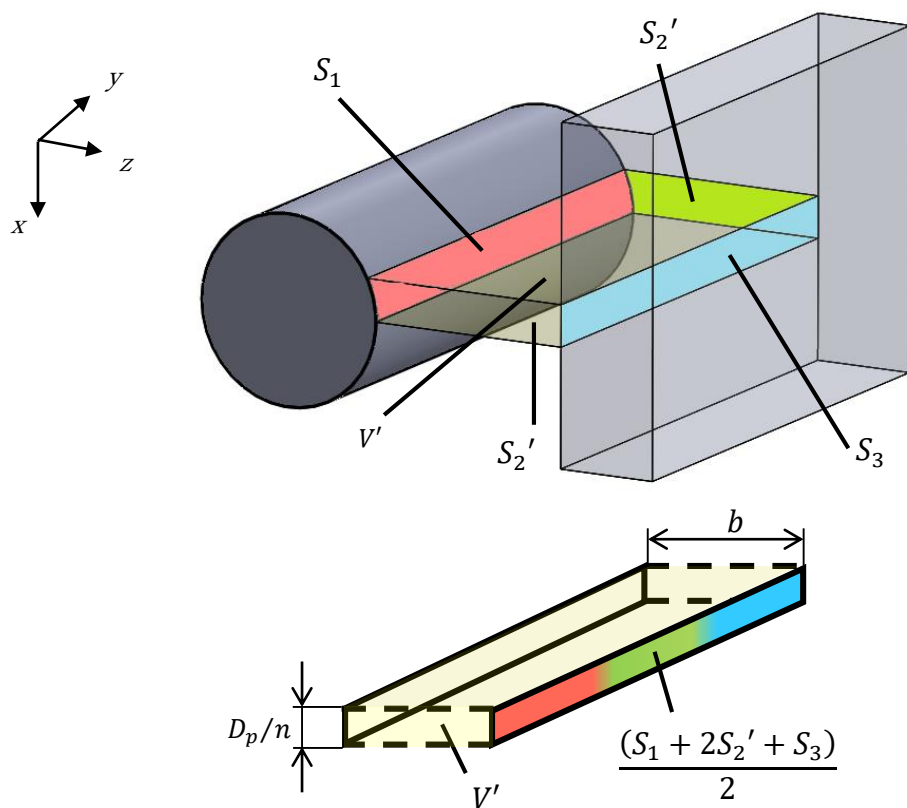


図 5-9 x 方向に n 分割したユニット II における平行な 2 平面への近似例

5.4 平行な 2 平面間のすきまにおける伝搬定数と特性インピーダンス

平行な 2 平面間のすきまにおいて、減衰を考慮した伝搬定数と特性インピーダンスは、3.5 節で述べた方法で算出する。前節で求めた各層における 2 平面間のすきま量を式 (3-20) に当てはめ、複素密度と複素圧縮率を求める。次に式 (3-21) から伝搬定数と特性インピーダンスを算出する。

5.5 伝達マトリックスの算出

本節では、本検討で扱う試料全体の伝達マトリックスを算出する。試料全体の伝達マトリックスを求める為にいくつかの段階に分ける。最初に5.3節で扱った解析ユニット I, IIの伝達マトリックス, 次に円柱層としての伝達マトリックス, そして試料全体の伝達マトリックスを求める。

5.5.1 解析ユニットの伝達マトリックス

5.3節で扱った解析ユニット I, IIにおいて、分割した各層における2平面間のすきま量から式(3-20), (3-21)により、伝搬定数と特性インピーダンスを求める。求めた伝搬定数と特性インピーダンスを式(3-2)に当てはめる事で各層の伝達マトリックスを算出する。これら各層の伝達マトリックスを音波入射面の方から $T_1, T_2 \sim T_n$ とする。

図5-10(a)に示すように、各層の伝達マトリックスを3.6.1項で述べた縦続接続によって解析ユニットとしての伝達マトリックスを求める。2本の円柱間に囲まれた空隙部である解析ユニット Iの伝達マトリックスは図5-10(b)に示すように T_u , 1本の円柱と試料ホルダー間に囲まれた解析ユニット IIは図5-10(c)に示すように T_w とする。

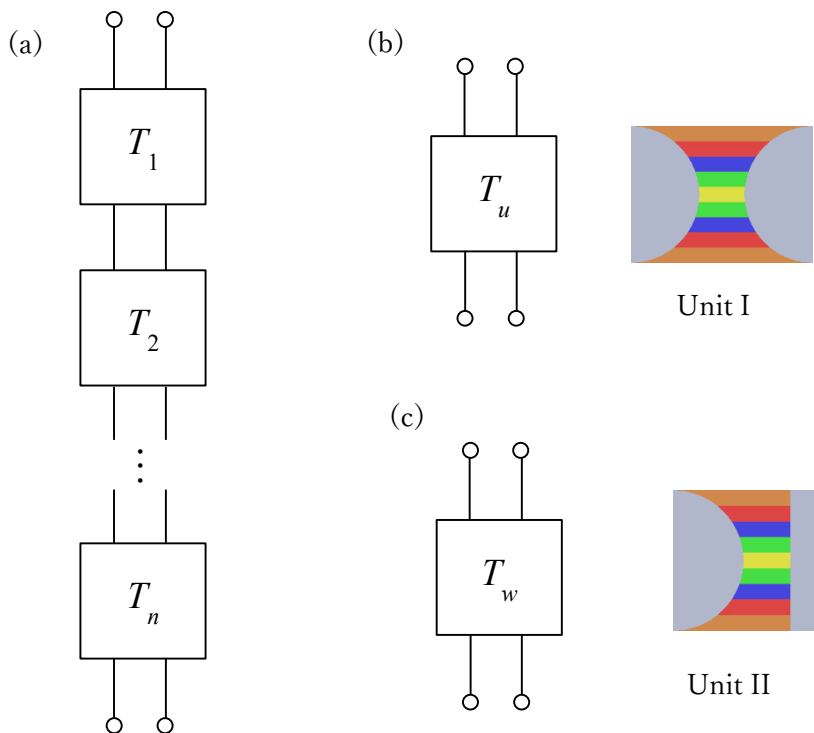


図5-10 解析ユニットの等価回路

(a) T_n の縦続接続による等価回路, (b) 接続後の解析ユニット I (T_u)

(c) 接続後の解析ユニット II (T_w)

5.5.2 円柱群 1 層の伝達マトリックス

前項で求めた T_u , T_w から円柱群 1 層の伝達マトリックスを求める．ここでは図 5-11(b)に示すように， z 軸方向の円柱群を考え， T_u , T_w を並列に接続する(図 5-11(a))．並列接続については 3.6.2 項に述べた．この結果，円柱群 1 層の伝達マトリックスとして T_l を求められる．

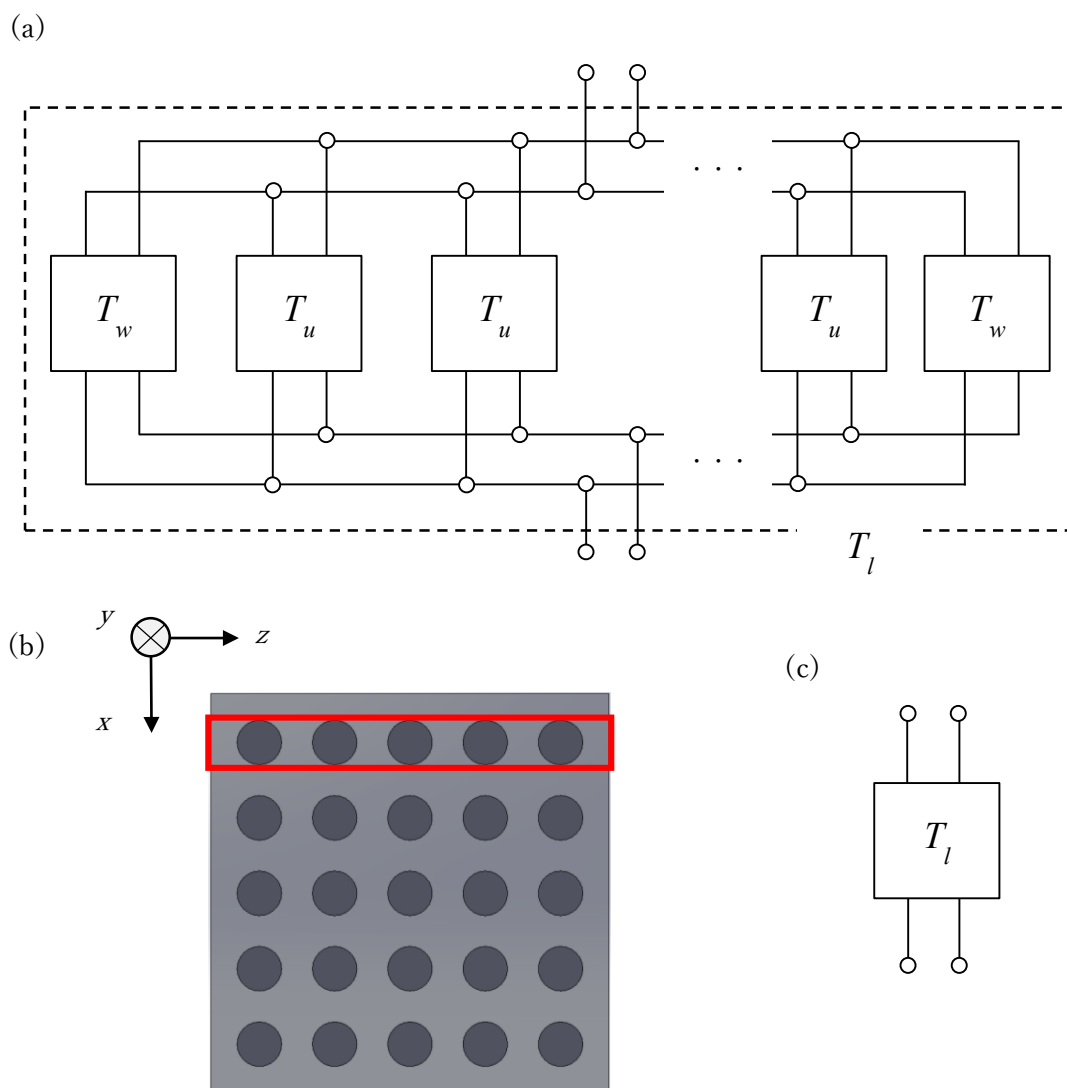


図 5-11 円柱群 1 層の等価回路

(a) T_u と T_w の並列接続，(b) 試料のモデル図，(c)接続後の伝達マトリックス T_l

5.5.3 試料全体の伝達マトリックス

前項で求めた円柱群 1 層の伝達マトリックス T_l と空気層 T_a を縦続接続することにより、試料全体の伝達マトリックス T_{all} を求める。

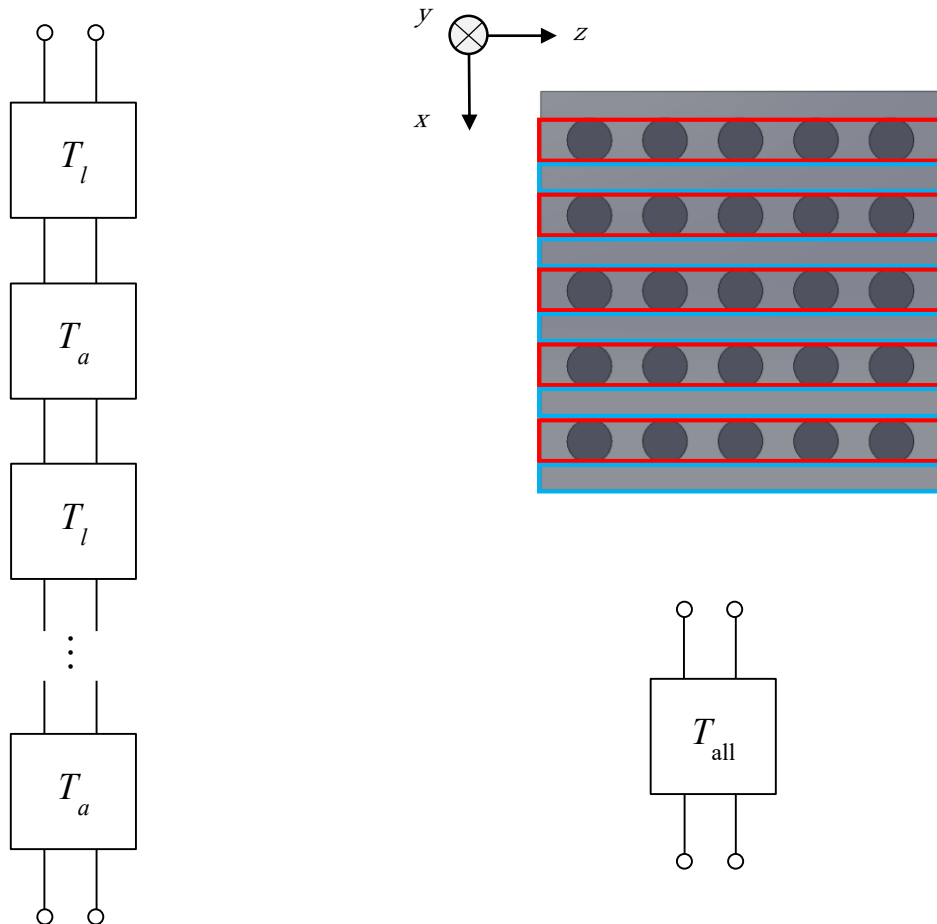


図 5-12 試料全体の等価回路

(a) T_l と T_a の縦続接続, (b) 試料のモデル図, (c) 接続後の伝達マトリックス T_{all}

5.6 吸音率の算出

前項で求めた試料全体の伝達マトリックス T_{all} から吸音率を算出する。吸音率の算出については 3.3 節, 4.5 節と同様であり, 式(3-10), (3-13), (3-14), (3-15)から比音響インピーダンス Z_0 , 反射率 R を求め, 吸音率 α を求める。

5.7 実験結果

本節では本章で対象とした試料の吸音特性について、実験結果と数理モデルによる理論解析の比較を行う。図5-13に円柱間ピッチ3.5mmにおける実験結果と理論解析結果を示す。また図5-14に円柱間ピッチ4.2mmにおける実験結果と理論解析結果を示す。

いずれの結果においても、吸音率の周波数特性において実験結果と解析結果は近い傾向を示す。特に吸音率のピークを示す周波数は精度良く推定された。吸音率の値は全体的に解析結果の方が低い傾向であるが、試料間の定性的な関係は一致した。

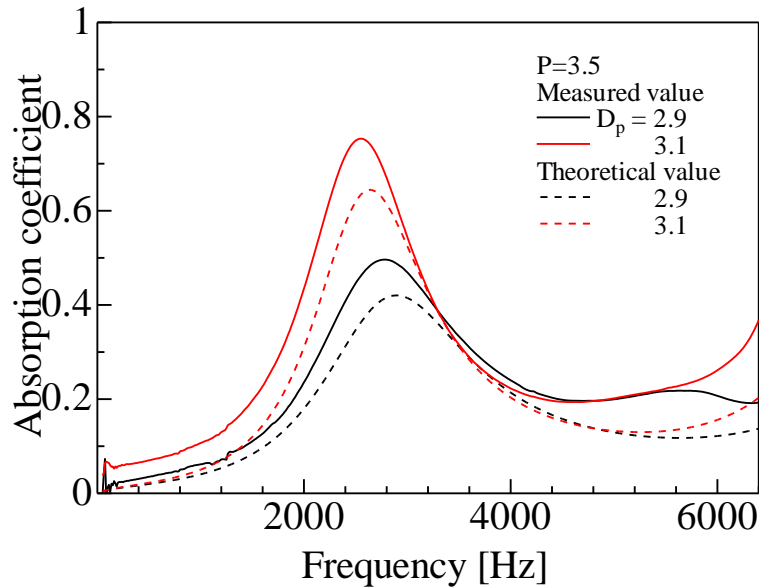


図5-13 円柱間ピッチ3.5mmの試料における実験結果と理論解析結果

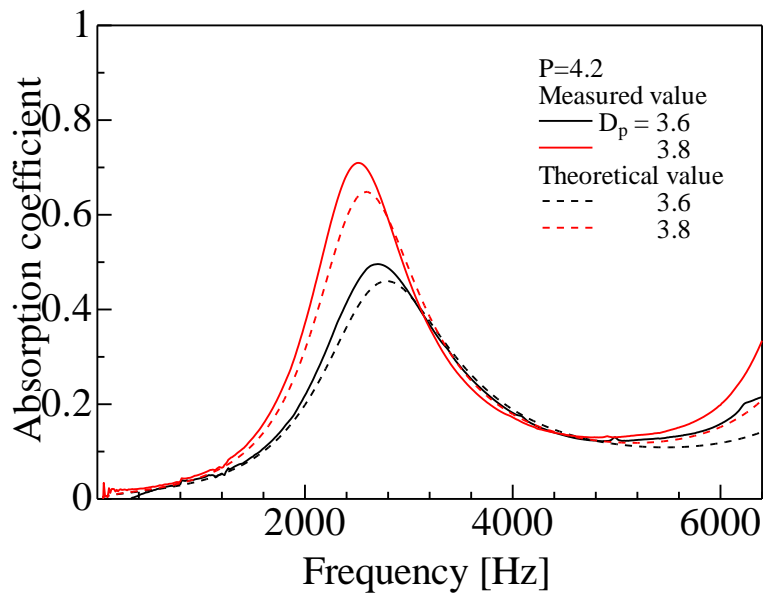


図5-14 円柱間ピッチ4.2mmの試料における実験結果と理論解析結果

5.8 パラメータスタディ

第4章の結果を含め、構築した数理モデルは剣山状構造における吸音特性を推定できる事を示した。本節では数理モデルを用いて試料とは異なる諸元の吸音特性を評価する。

図5-15は剣山状構造において同一の寸法とした場合の、音波入射方向による吸音特性を比較したものである。吸音率は音波が側面から入射する方が高く、ピークを示す周波数が低くなる。また円柱の直径 D_p を増加すると吸音率が高くなる。

円柱の直径については、円柱間のすきまが狭くなる事により吸音効果が高くなると考えられ、音波の入射方向による差異は、音波の進行経路が関係すると考えられる。円柱に平行に入射する場合は、音波は円柱に沿って進行するのに対し、側面から入射する場合は円柱層と空隙層が混在する事で、経路の乱れや拡大・縮小が伴う為と考える。

図5-16、図5-17は円柱間ピッチ P を3.5mmとし、円柱の直径を変化させた場合の吸音率の変化を示したものである。4.7節でも同様の検討を行ったが、円柱の直径が大きくなると吸音率が高くなり、ピークを示す周波数は徐々に下がる。これは円柱の直径を大きくする事で、円柱間のすきまが狭くなり、音波の減衰効果が増大する為である。

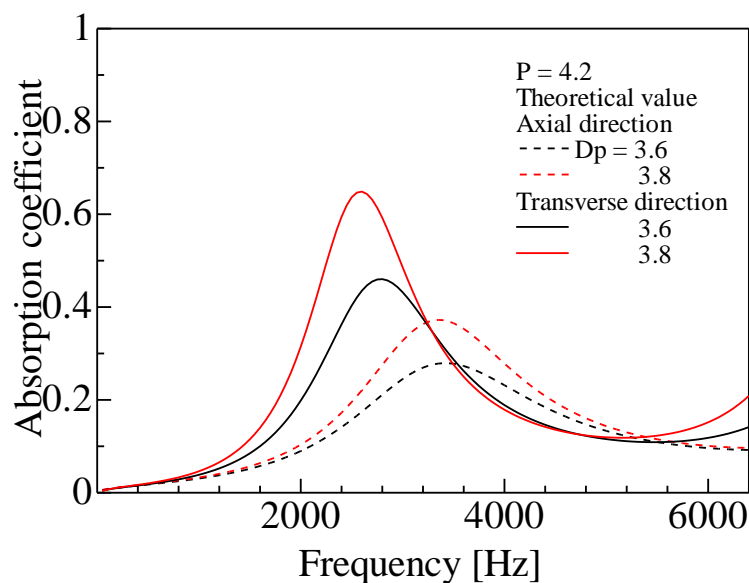


図5-15 円柱間ピッチ4.2mmにおける剣山状構造での音波入射方向による吸音率の比較(数理モデルでの比較)

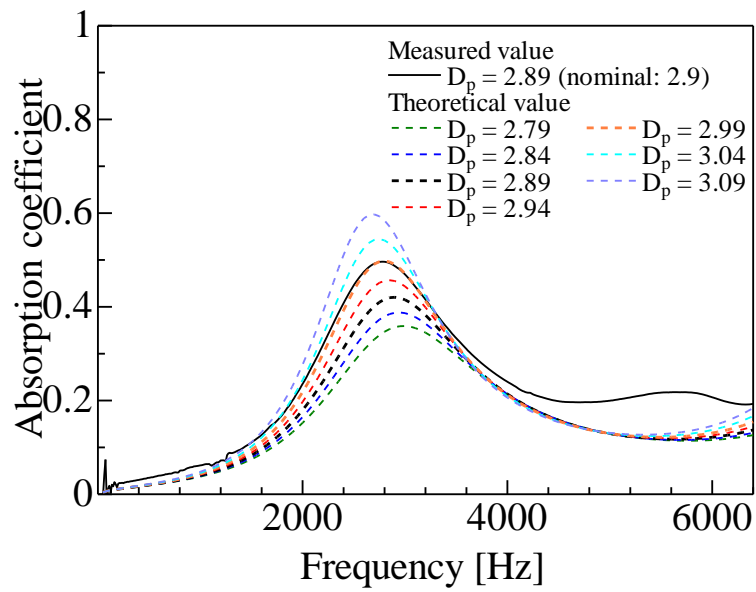


図 5 -16 円柱の直径 D_p を変化させた場合の吸音率の変化($P=3.5\text{mm}$, $D_p=2.79\sim 3.09\text{mm}$)

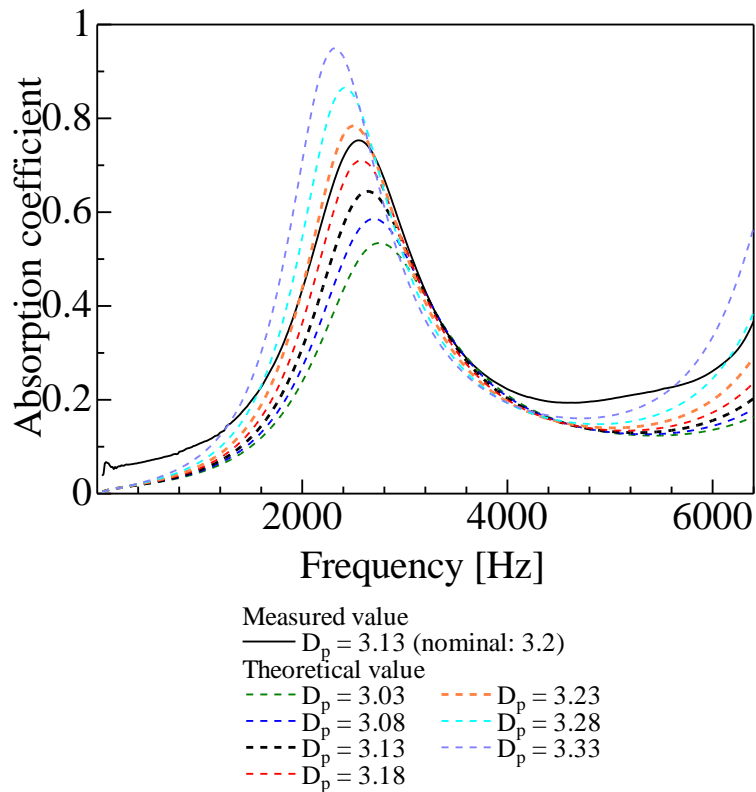


図 5 -17 円柱の直径 D_p を変化させた場合の吸音率の変化($P=3.5\text{mm}$, $D_p=3.03\sim 3.33\text{mm}$)

5.9 結言

円柱群で構成される剣山状構造について、円柱軸に垂直な方向から音波が入射する際の吸音特性を推定する数理モデルを構築し、実験結果と比較した。対象とする構造は音波の入射方向に対し空隙部の断面が変化する為、断面変化を考慮した。

数理モデルを構築するにあたり、空隙部を任意の層で分割し、平行な2平面のすきまへ近似した。近似した各層のすきま量から、層ごとの伝達マトリックスを求めた。求めた伝達マトリックスをもとに縦続接続、および並列接続を組み合わせ、試料全体の伝達マトリックスを求めた。求めた試料全体の伝達マトリックスから試料の吸音率を推定した。

吸音率について推定した理論解析結果と実験結果を比較すると、全体的な周波数特性において両者は近い傾向を示した。特に吸音率のピークとなる周波数は精度よく推定された。吸音率の値は解析結果の方が低くなる傾向であるが、試料間の定性的な関係は実験結果と一致し、数理モデルの有用性を確認できた。

構築した数理モデルを用いて剣山状構造に関するパラメータスタディを行った。同一寸法における剣山状構造について、音波の入射方向の違いによる吸音特性を数理モデルによる解析で比較した。その結果音波が円柱の側面から入射する方が高い吸音率を示した。側面から入射する場合、円柱層と空隙層が混在する事で音波の進行経路が乱れる事や、空隙の拡大・縮小が寄与していると考えられる。

5.10 参考文献

- [1] Takamasa SATOH, Shuichi SAKAMOTO, Shunsuke UNAI, Takunari ISOBE, Kenta IIZUKA, “Sound-absorption coefficient of a pin-holder structure for sound waves incident in the direction,” Noise Control Engineering Journal, Vol.70 No.2, 2022.
- [2] 宇内俊介, 坂本秀一, 佐藤隆政, 磯部卓功, 飯塚健太, 剣山構造に関する吸音率の理論的推定と実験(円柱の軸方向に対して音波が垂直に入射する場合), 日本機械学会北陸信越支部 第57期総会・講演会講演論文集, No. 207-1, Paper No. I012 (2020. 3. 8), 長岡技大, 4 pages.
- [3] 磯部卓功, 坂本秀一, 佐藤隆政, 飯塚健太, 田崎克彦, 規則的に配列した円柱群の側面に入射する吸音率の理論的推定と実験(空隙部分の体積と曲面の面積を考慮した解析), 日本機械学会北陸信越支部 第58期総会・講演会講演論文集, No. 217-1, Paper No. C013 (2021. 3. 6), 信州大, 5 pages.

- [4] Takamasa Satoh, Shuichi Sakamoto, Isami Nitta, Shunsuke Unai, Takunari Isobe, Kenta Iizuka, Katsuhiko Tasaki, Estimation and experimental test of the sound-absorption coefficient of a pin-holder structure (Case of sound waves incidence upon the side surfaces of a group of cylinders), Proceedings of INTER-NOISE 2021 (50th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering), Washington, DC, U. S. A., Paper No. 2497, 6 pages, 1-5 August 2021.
- [5] Siwadol K., Sungkom S., Sujin B., “Optimal Geometrical Design of Multiple Heights Pin-Fin Heat Sink Using MOPBIL,” The 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand, Paper No. CTS-018272, 7 pages, 2009.
- [6] Ko-Ta C., Fu-Ping C., “Application of response surface methodology in the parametric optimization of a pin-fin type heat sink,” International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol.33, pp. 836-845, 2006.

第6章 網目構造・フレーム構造

6.1 緒言

本章では網目構造・フレーム構造の吸音特性を推定する数理モデルを構築する[1][2]。これまでの剣山状構造は円柱の向きが一方向であったが、網目構造では円柱が垂直に交差する。1つの面内で円柱が垂直に交差する上、音波の入射側から見た空隙部の断面が変化する。空隙部の扱いが複雑になり、第5章で実施した理論解析を応用する[3][4][5][6]。フレーム構造は網目構造に剣山状構造が付与される。

本章の流れは、試料の諸元について述べ、網目構造について吸音特性を推定する数理モデルの内容を示す。円柱が交差して構成される空隙部の吸音効果を考慮する。次にフレーム構造の吸音特性を推定する数理モデルの内容を示す。網目構造に対し剣山状構造が付与される場合の吸音効果を考慮する[7][8]。試料の吸音特性について実験結果と解析結果を比較し、数理モデルの有用性を示す。最後に第4章から本章まで扱った各種構造について吸音特性を比較し、構造間の特徴を考察する。

6.2 試料

本検討で用いた試料について述べる。試料の概略図を図6-1に示す。また、試料を試料ホルダーに取り付けた写真を図6-2、図6-3に示す。

試料はFormlab製の3DプリンタのForm2を使用し、純正の光硬化性樹脂を用いて製作した。試料を構成する円柱の長さは25.7mmとし、円柱の直径、ピッチを変化させた際の吸音率への影響を比較した。

試料は一辺が25.7mmのアルミ合金製の試料ホルダーに挿入して測定を行った。また、試料以外の吸音の要因を排除する為、試料ホルダーと試料の土台のすきまはワセリンで充填した。

試料で変化させた寸法の諸元は表6-1のとおりである。

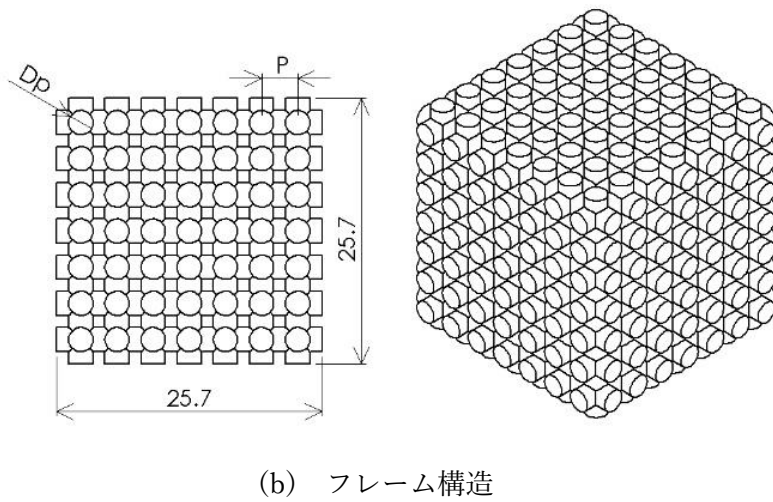
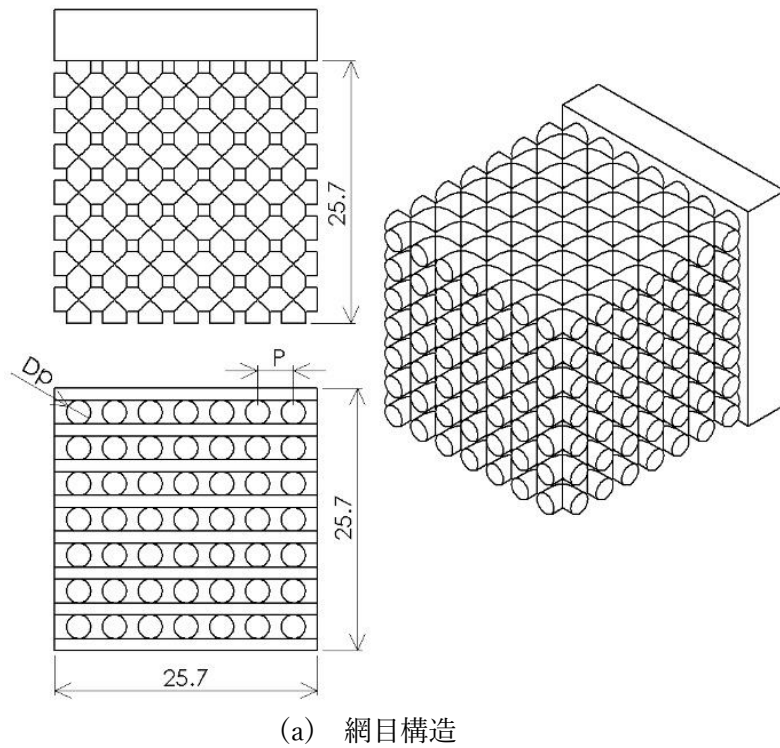
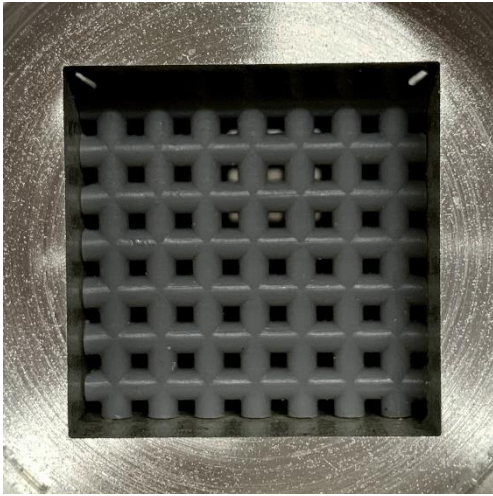
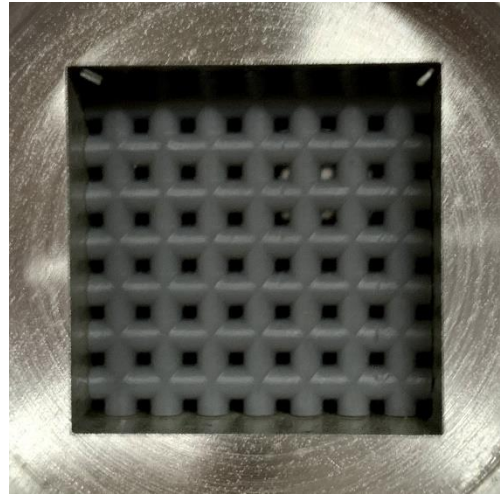


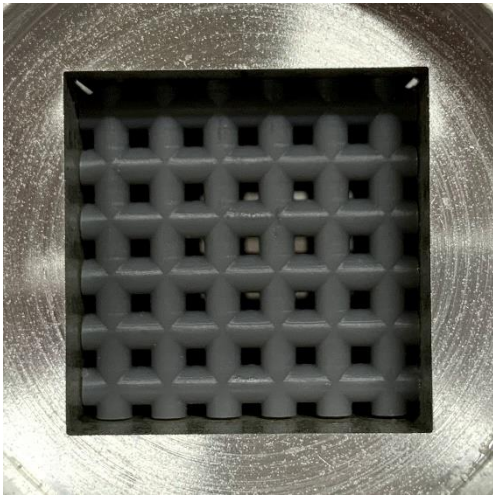
図 6-1 試料の概略図



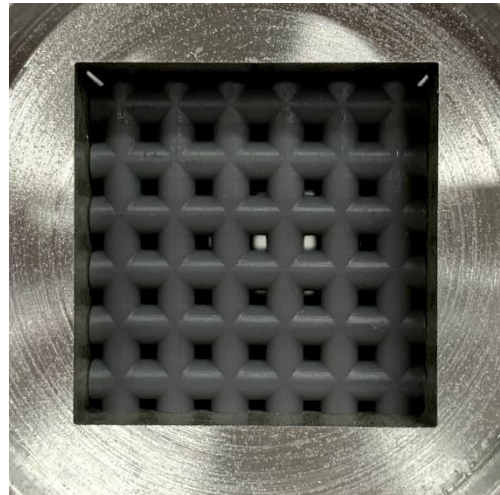
(a) $D_p = 2.3 \text{ mm}$, $P = 3.5 \text{ mm}$,
 $N_m = 64$



(b) $D_p = 2.5 \text{ mm}$, $P = 3.5 \text{ mm}$,
 $N_m = 64$

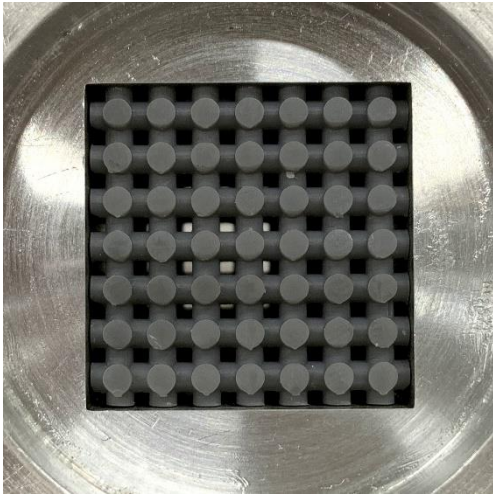


(c) $D_p = 2.8 \text{ mm}$, $P = 4.2 \text{ mm}$,
 $N_m = 49$

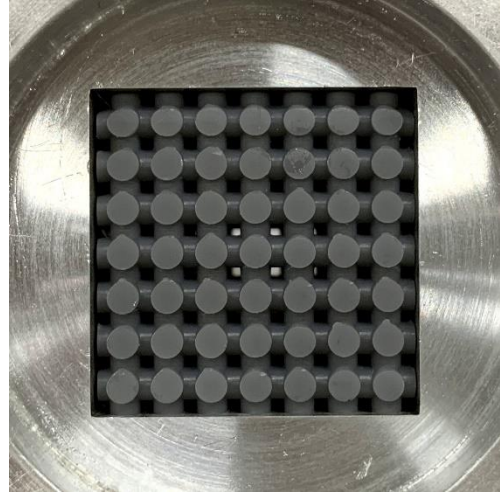


(d) $D_p = 3.0 \text{ mm}$, $P = 4.2 \text{ mm}$,
 $N_m = 49$

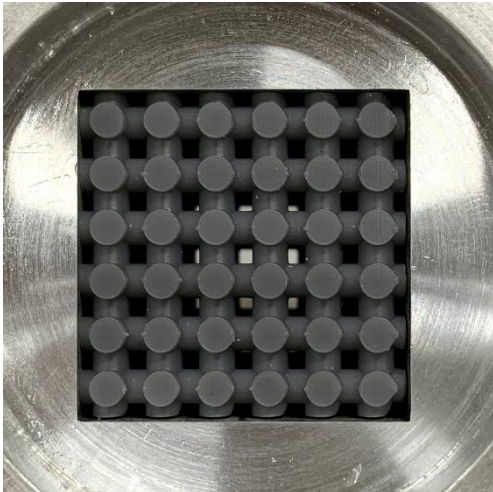
図 6-2 音響管に取り付けた試料ホルダーと試料(網目構造)



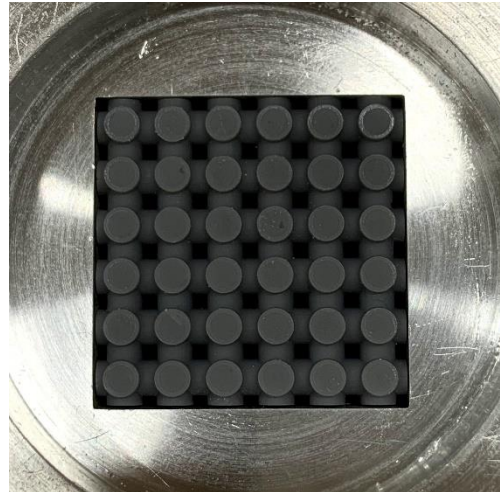
(a) $D_p = 2.3 \text{ mm}$, $P = 3.5 \text{ mm}$,
 $N_m = 64$, $N_p = 49$



(b) $D_p = 2.5 \text{ mm}$, $P = 3.5 \text{ mm}$,
 $N_m = 64$, $N_p = 49$



(c) $D_p = 2.8 \text{ mm}$, $P = 4.2 \text{ mm}$,
 $N_m = 49$, $N_p = 36$



(d) $D_p = 3.0 \text{ mm}$, $P = 4.2 \text{ mm}$,
 $N_m = 49$, $N_p = 36$

図6-3 音響管に取り付けた試料ホルダーと試料(フレーム構造)

表 6-1 試料の諸元

円柱の直径 [mm]	円柱間ピッチ [mm]	試料の長さ [mm]	円柱の数 N_p	網目の数 N_m	網目層の数	試料写真との関係	構造の分類	
2.3	3.5	25.7		64	7	図 6-2 (a)	網目	
2.5						図 6-2 (b)		
2.8	4.2			49	6	図 6-2 (c)		
3.0						図 6-2 (d)		
2.3	3.5		25.7	49	64	7	図 6-3 (a)	フレーム
2.5							図 6-3 (b)	
2.8	4.2			36	49	6	図 6-3 (c)	
3.0							図 6-3 (d)	

6.3 網目構造における吸音率の理論解析

本検討で対象とする試料の構造は、音波の入射方向に対し、空隙部の断面が変化する構造である。吸音率の推定の方法は第5章の内容に近い。ただし、試料の構造は複雑であり、吸音率の算出までを順に述べる。

6.3.1 円柱4本に囲まれた解析ユニット

本項では網目構造を対象とする。網目構造のモデル図を図6-4に示す。音波の入射方向に垂直な面(yz面)を構成する円柱層に着目し、図6-4に示す赤枠部分の4本の円柱に囲まれた空隙部を解析ユニットIとする。図6-5に示すように、解析ユニットIを音波入射方向(x方向)へn層に分割する。この分割はx方向に厚さが均一になるようにする。円柱の直径は D_p である為、一層の厚みは D_p/n となる。実際には分割数nは100分割で実施した。

各層を平行な2平面へ近似するが、各層での空隙部の体積、および空隙部と円柱とが接触する接触面積を予め算出する必要がある。図6-6に解析ユニットIの任意の分割層を平行な2平面へ近似する例を示す。分割層にて空隙部と1本の円柱が接触する面の面積を S_{m1} とする。図6-7に示すように S_{m1} を構成する円弧の中心角は θ_n となり、 θ_n は次式で表せる。ここでrは円柱の半径である。

$$\theta_n = \cos^{-1} \left\{ 1 - \left(\frac{x}{r} + \frac{D_p}{nr} \right) \right\} - \cos^{-1} \left(1 - \frac{x}{r} \right) \quad (6-1)$$

円柱のピッチが P である為、円柱と空隙部との接触面積 S_{m1} は次式から求められる。

$$S_{m1} = \int (P - 2r \sin \theta) r d\theta \quad (6-2)$$

分割層における空隙部の体積 V_{m1} は以下の式で表せる。

$$V_{m1} = \int (P - 2\sqrt{r^2 - x^2})^2 dx \quad (6-3)$$

図 6-6 に示すように、2 平面間のすきま量 b は次式から求められる。

$$b = \frac{V_{m1}}{2S_{m1}} \quad (6-4)$$

また、網目構造の x 軸方向の開口部には、網目の層間に空間が存在し、且つ空隙部は入射方向から見て正方形である事から開口端補正を付加した。図 6-5 において最も狭い空隙の層をオリフィスとみなしている。最も狭い空隙の断面積と等しい面積の円を考え、その円の半径の 0.4 倍の補正長を最も狭い分割層 D_p/n に付加した。補正長は次式となる。

$$\Delta l = \frac{P - D_p}{\sqrt{\pi}} \times 0.4 \quad (6-5)$$

6.3.2 円柱 3 本と試料ホルダー内壁に囲まれた解析ユニット

次に図 6-8 に示すような円柱 3 本と試料ホルダー内壁に囲まれた空隙部を解析ユニット II とする。前項と同様、解析ユニット II を音波入射方向に n 分割し、各層を平行な 2 平面へ近似する。図 6-9 に分割した層における平行な 2 平面への近似例を示す。

円柱と空隙部の接触面積 S_{m1} は解析ユニット I と同様に求める。 S_{m2} は試料ホルダーに突き当たる円柱の側面積であり、次式から求められる。ここで、 L_t は試料ホルダーの一辺の長さであり、 $L_t = 25.7\text{mm}$ である。

$$S_{m2} = \int \left\{ \frac{L_t - (\sqrt{N_p} - 1)P}{2} - r \sin \theta \right\} r d\theta \quad (6-6)$$

試料ホルダー内壁に関する面積 S_{m3} は、図6-10に示すように、円柱間のピッチと層厚さから構成される長方形から、長方形と円柱が重なる面積を引いて求められる。図6-10において、赤枠内の面積 A_{ar} は次式から求められる。

$$A_{ar} = \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{r^2 - x^2} dx \quad (6-7)$$

求めた A_{ar} によって円柱の側面と試料ホルダー内壁で構成する S_{m3} が求められる。

$$S_{m3} = \frac{D_p}{n} \times P - 2A_{ar} \quad (6-8)$$

また、分割層における空隙部の体積 V_{m2} は次式から求められる。

$$V_{m2} = \int \left\{ \frac{L_t - (\sqrt{N_p} - 1)P}{2} - \sqrt{r^2 - x^2} \right\} (P - 2\sqrt{r^2 - x^2}) dx \quad (6-9)$$

図6-9に示すように、求めた V_{m2} 、 S_{m1} 、 S_{m2} 、 S_{m3} から、近似した2平面間のすきま量 b を求められる。

$$b = \frac{V_{m2}}{\frac{(S_{m1} + 2S_{m2} + S_{m3})}{2}} \quad (6-10)$$

6.3.3 円柱2本と試料ホルダー内壁2面に囲まれた解析ユニット

網目構造の最後の解析ユニットとして、図6-11における赤枠内の解析ユニットⅢを考える。解析ユニットⅠ、Ⅱと同様、音波入射方向(x 方向)に n 分割し、各分割要素を平行な2平面へ近似する。図6-12に解析ユニットⅢの任意の層を平行な2平面へ近似する例を示す。

円柱が試料ホルダー内壁に突き当たるまでの面積 S_{m2} は解析ユニットⅡと同様であり、式(6-6)から求められる。

試料ホルダー内壁と空隙部の接触面積 S_{m3}' は次式で表せる。

$$S_{m3}' = \frac{D_p}{n} \times \frac{L_t - (\sqrt{N_p} - 1)P}{2} - A_{ar} \quad (6-11)$$

図 6-12 より，分割層における空隙部の体積 V_{m3} は次式から求められる．

$$V_{m3} = \int \left\{ \frac{L_t - (\sqrt{N_p} - 1)P}{2} - \sqrt{r^2 - x^2} \right\}^2 dx \quad (6-12)$$

近似した 2 平面間のすきま量 b は V_{m3} ， S_{m2} ， S_{m3}' を用いて次式から求められる．

$$b = \frac{V_{m3}}{S_{m2} + S_{m3}'} \quad (6-13)$$

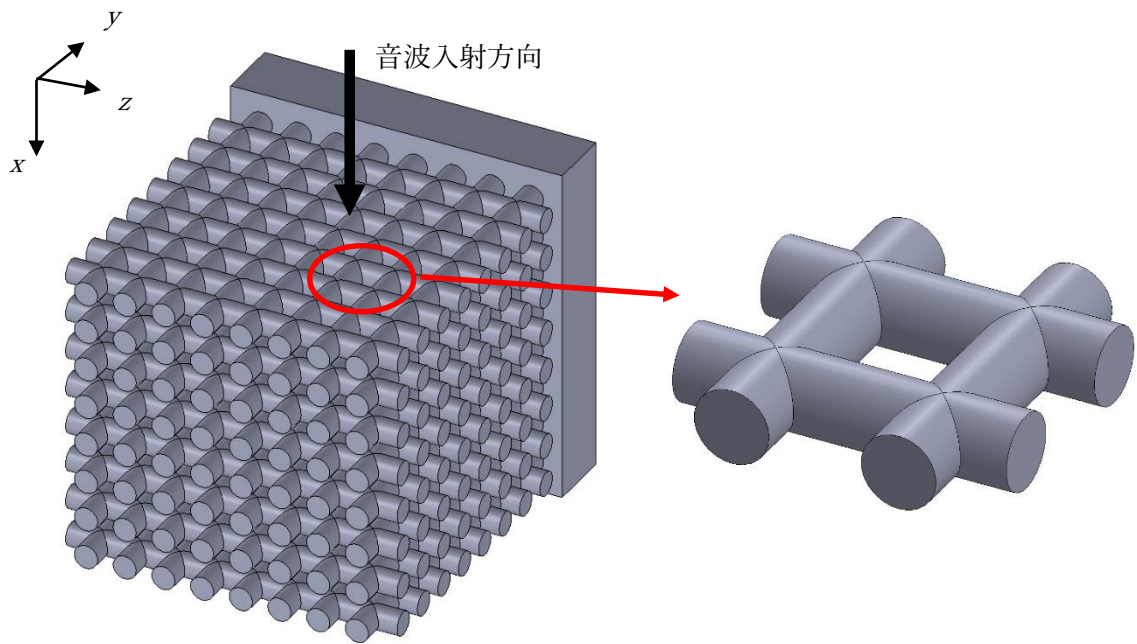


図 6-4 網目構造のモデル図と解析ユニット I

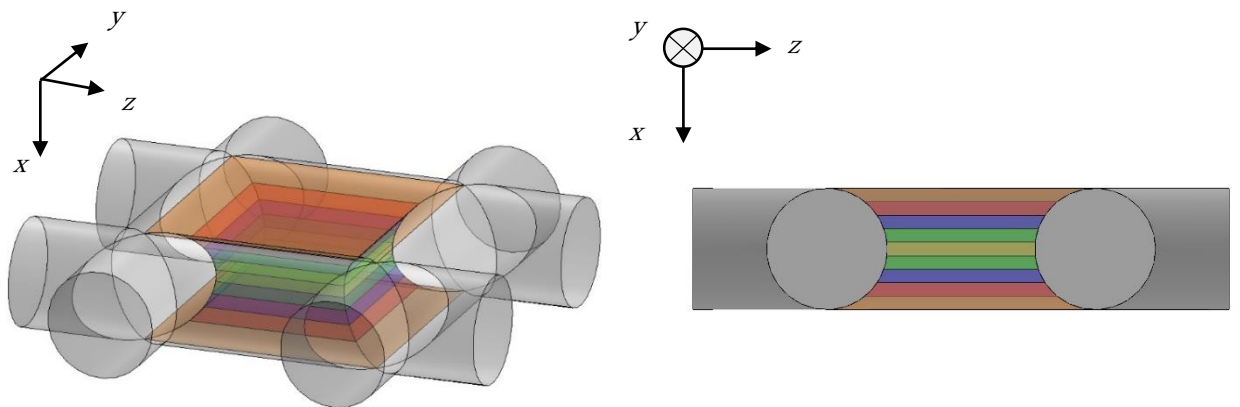


図 6-5 x 方向へ n 層に分割した解析ユニット I

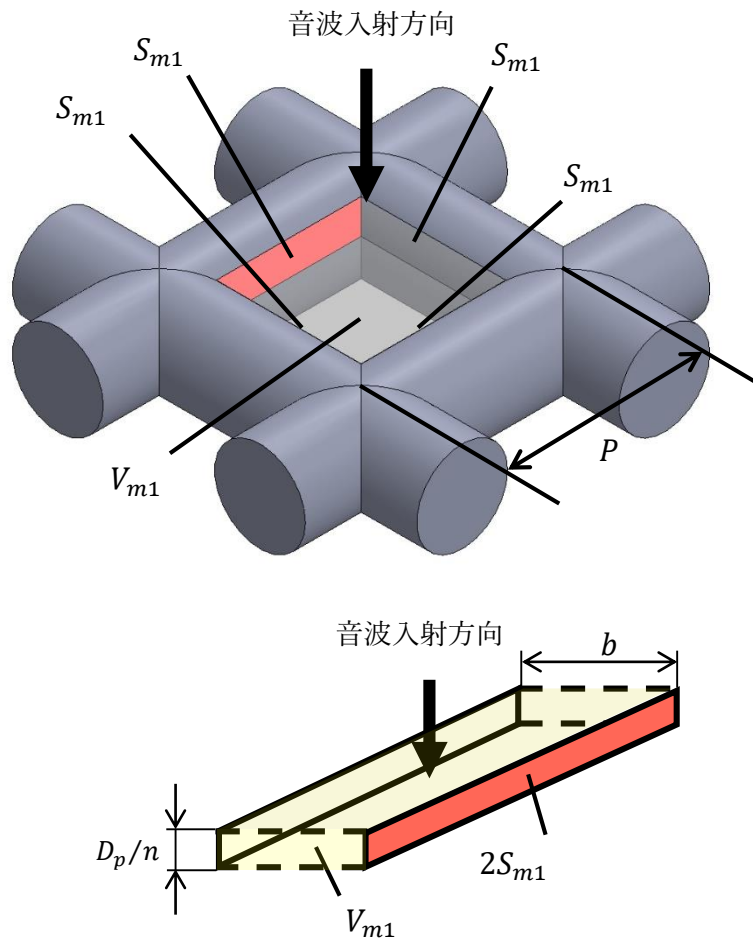


図 6-6 解析ユニット I の分割層における平行な 2 平面への近似例

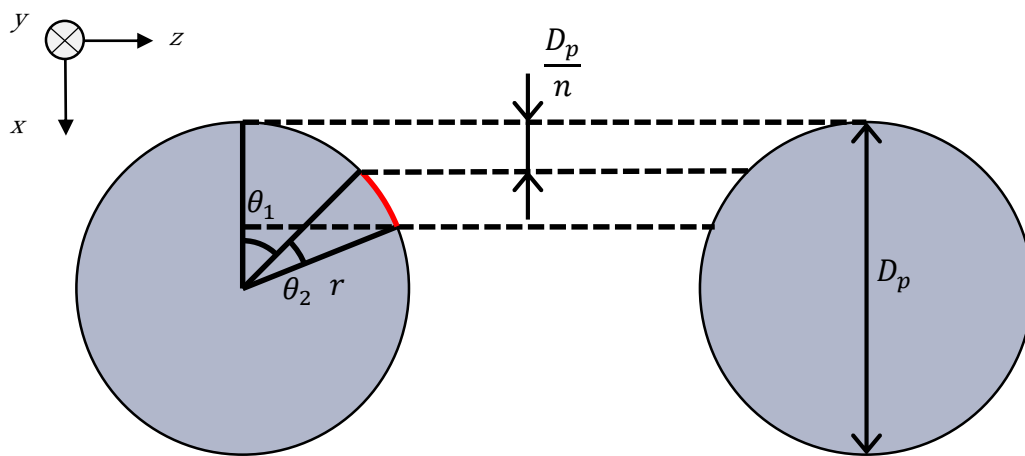


図 6-7 接触面積 S_{m1} を構成する円弧

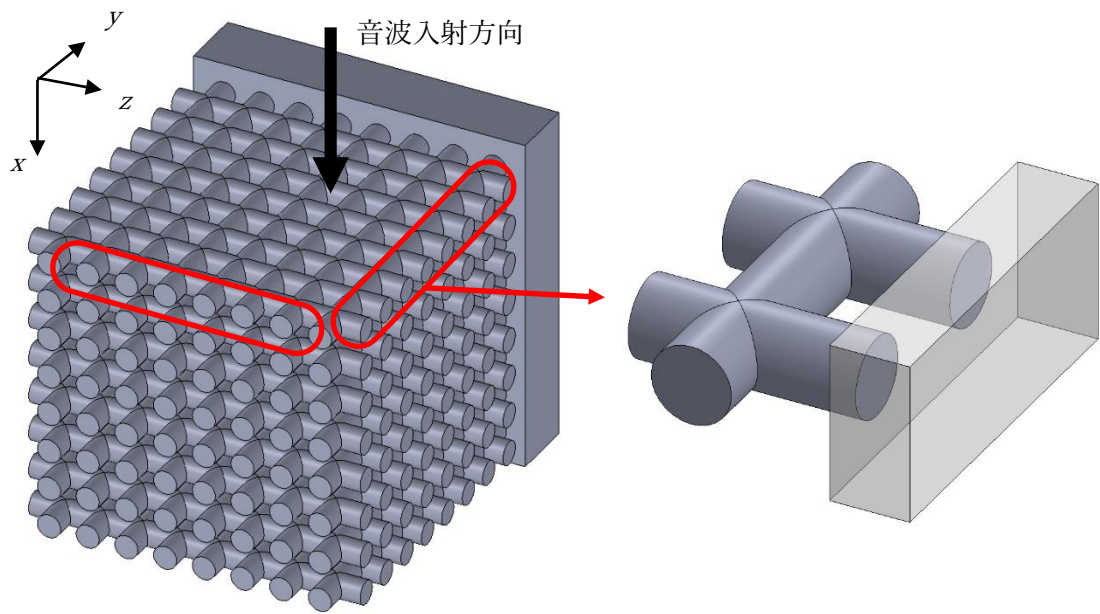


図 6 -8 網目構造のモデル図と解析ユニット II

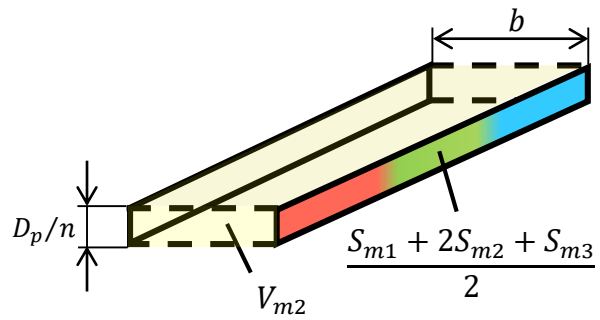
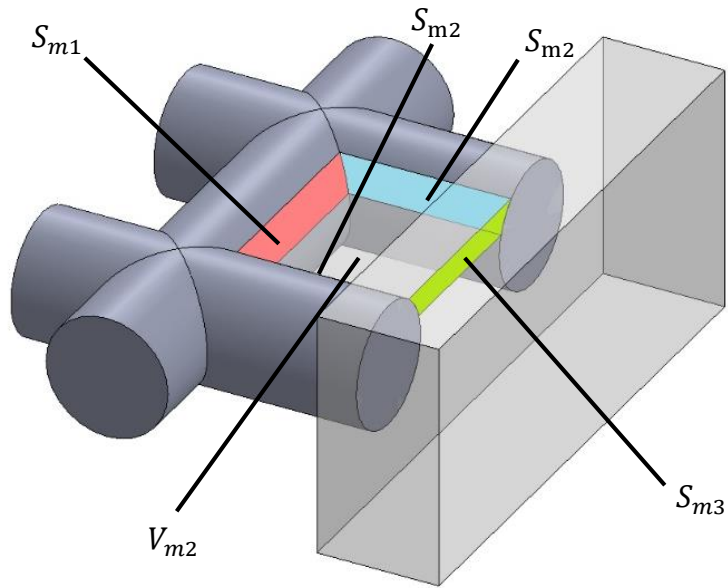


図 6-9 n 層に分割した解析ユニット II の分割層における平行な 2 平面への近似例

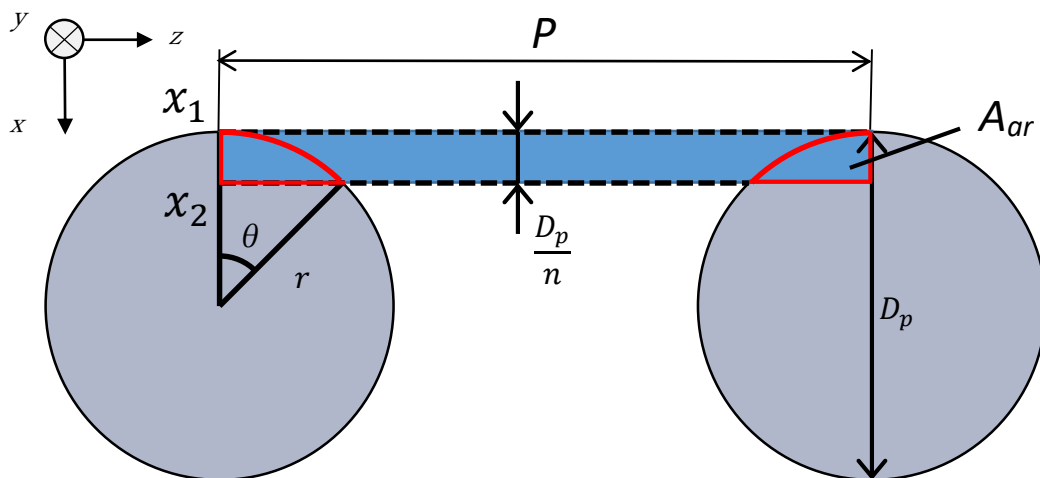


図 6-10 試料ホルダー内壁に接触する面積 S_{m3} に関するモデル図

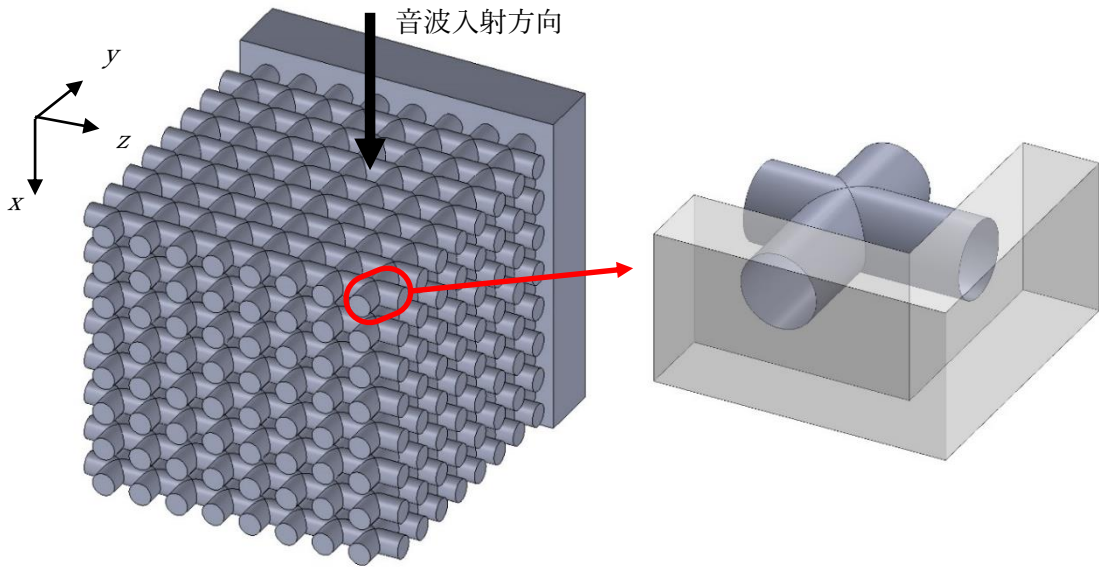


図 6-11 網目構造のモデル図と解析ユニット III

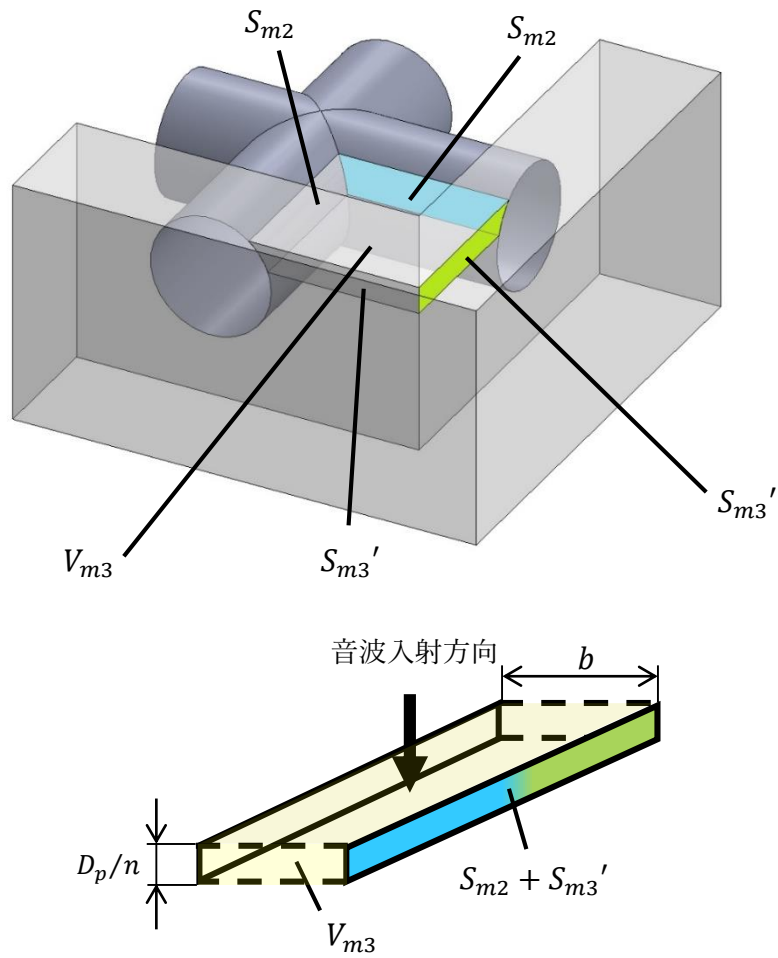


図 6-12 x 方向に n 分割された解析ユニット III の分割層における平行な 2 平面への近似例

6.3.4 各解析ユニットの伝達マトリックス

本項では前項までに求めた各解析ユニットの分割層における 2 平面間のすきま量から解析ユニットの伝達マトリックスを算出する。内容は 5.5.1 項に類似しており、各解析内の分割層ごとに、すきま量と式(3-20)、式(3-21)から伝搬定数と特性インピーダンスを求める。求めた伝搬定数と特性インピーダンスから式(3-2)によって層ごとの伝達マトリックスを求める。これら各層の伝達マトリックスを音波の入射方向から $T_1, T_2 \dots T_n$ とする。

図 6-13 に示すように各層の伝達マトリックスを縦続接続する事により解析ユニットごとの伝達マトリックスを求められる。縦続接続については 3.6.1 項で述べた。ここで解析ユニット I の伝達マトリックスを T_u 、解析ユニット II の伝達マトリックスを T_w 、解析ユニット III の伝達マトリックスを T_f とする。

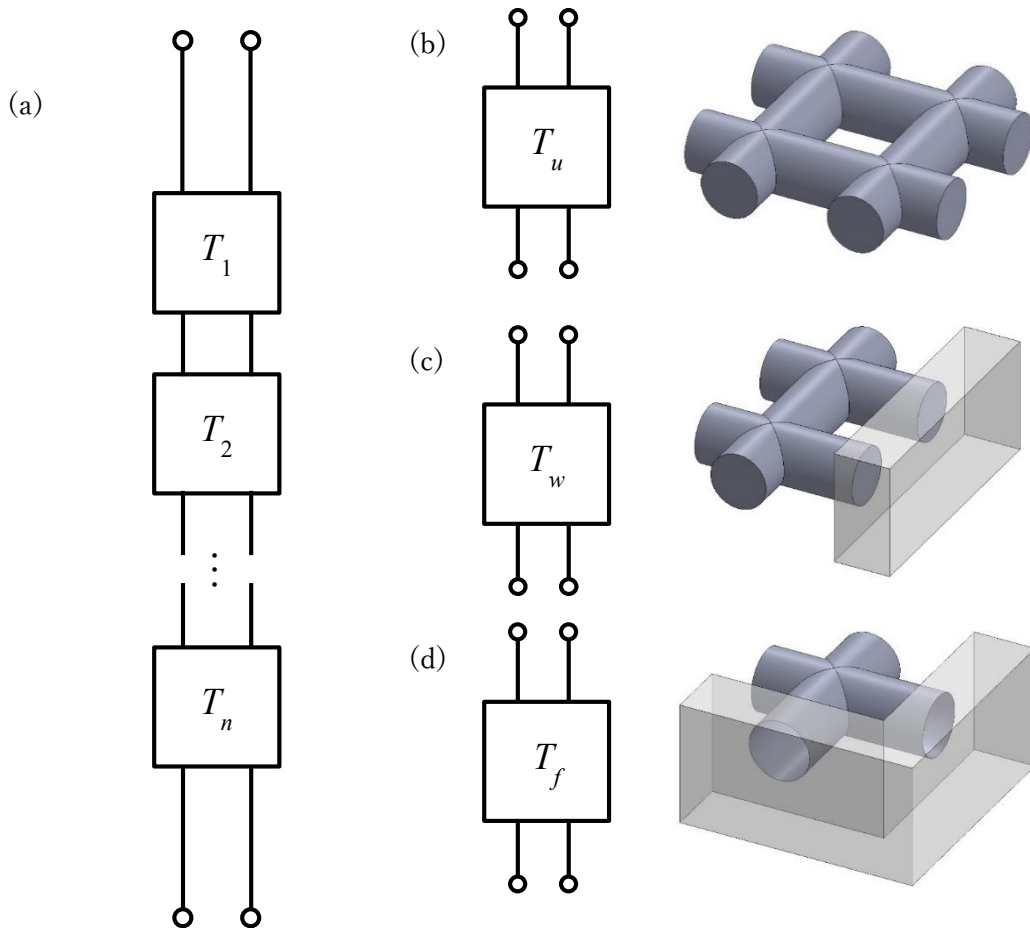


図 6-13 解析ユニットの等価回路

(a) T_n の縦続接続による等価回路, (b)接続後の解析ユニット I (T_u)
(c)接続後の解析ユニット II (T_w), (d)接続後の解析ユニット III (T_f)

6.3.5 円柱群1層の伝達マトリックス

次に円柱群1層の伝達マトリックスを求める。図6-14に示すように、前項で求めた解析ユニットの伝達マトリックス T_u , T_w , T_f をもとに yz 面上で構成する円柱群1層の伝達マトリックスを求める。実際の実施としては y 軸方向へ並列に接続した後に、 z 軸方向へ並列接続した。並列接続については3.6.2項で述べた。

図6-15に示すように、 T_w と T_f を接続したものを T_M とし、 T_u と T_w を接続したものを T_N とした。 T_M として接続する際は T_w が、 T_N として接続する際は T_u が y 軸方向の円柱数よりも1つ少なくなる。

図6-16に示すように、 y 軸方向に接続した T_w と T_N を z 軸方向へ並列に接続する。この結果、 yz 面に構成する円柱群1層の伝達マトリックス T_l を求められる。この時、 T_N の接続数は、 z 軸方向の円柱の数よりも1つ少なくなる。

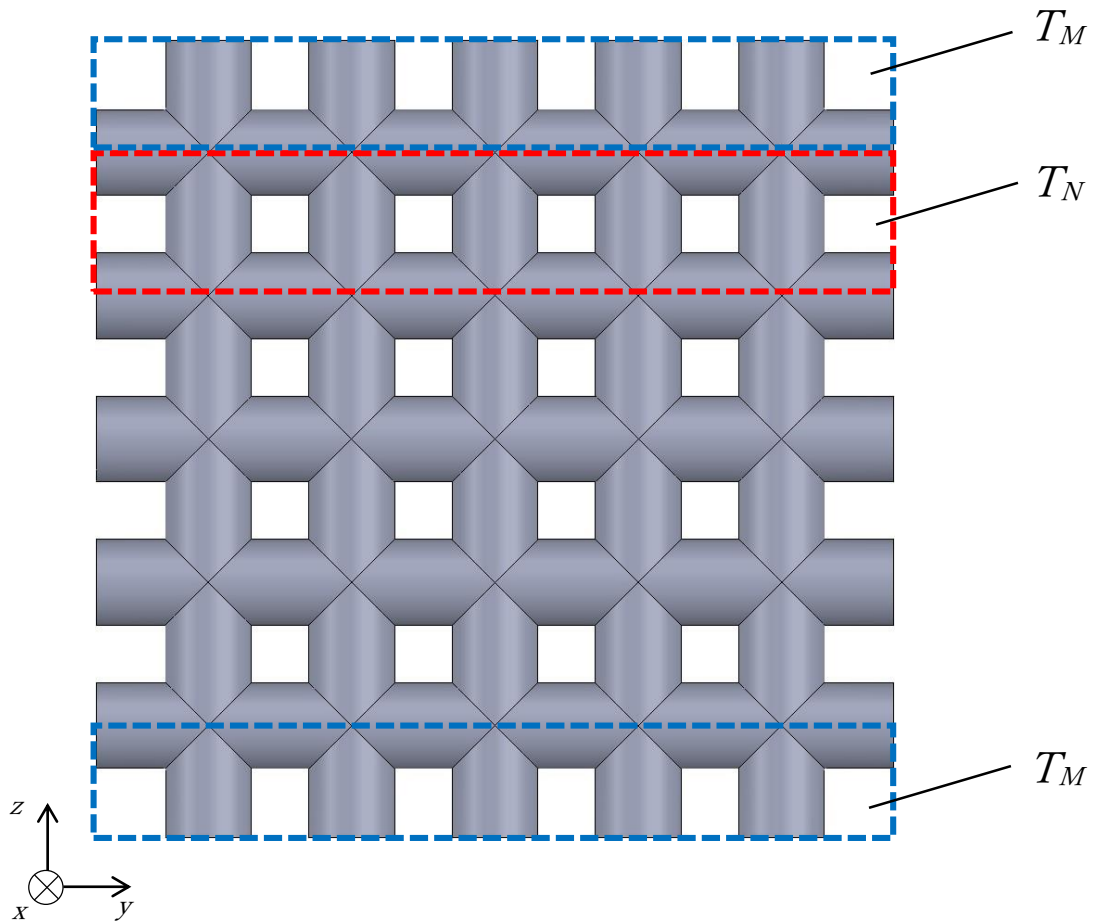
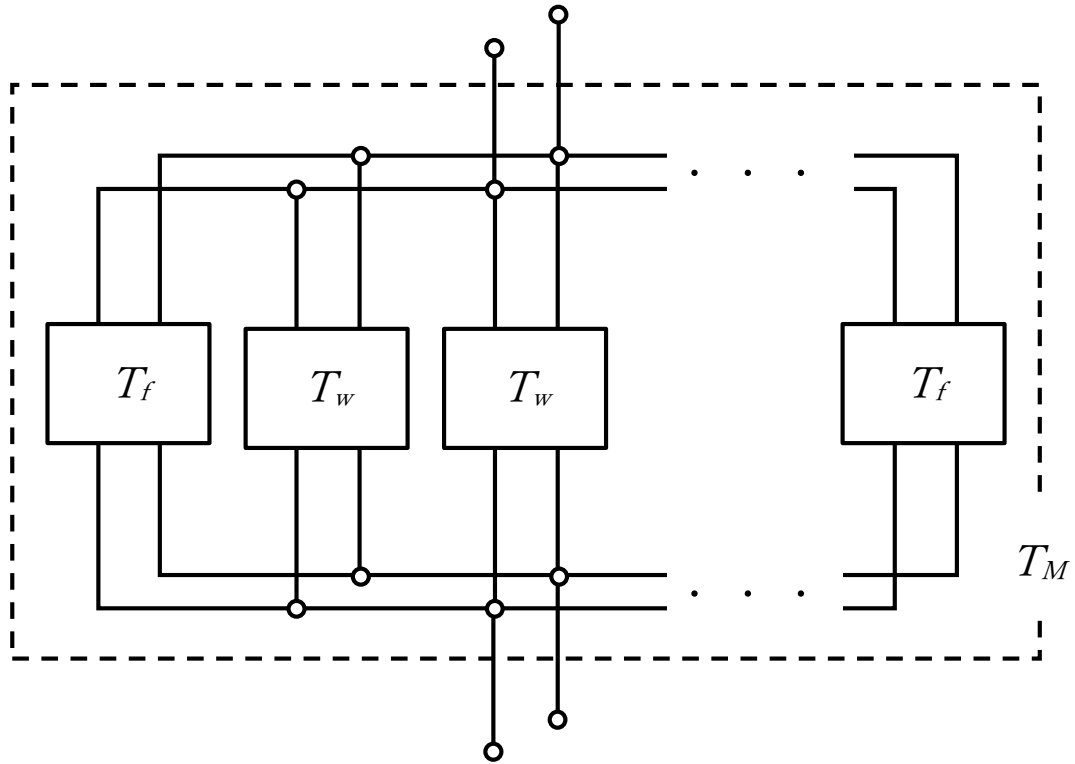


図6-14 網目1層のモデル図

(a)



(b)

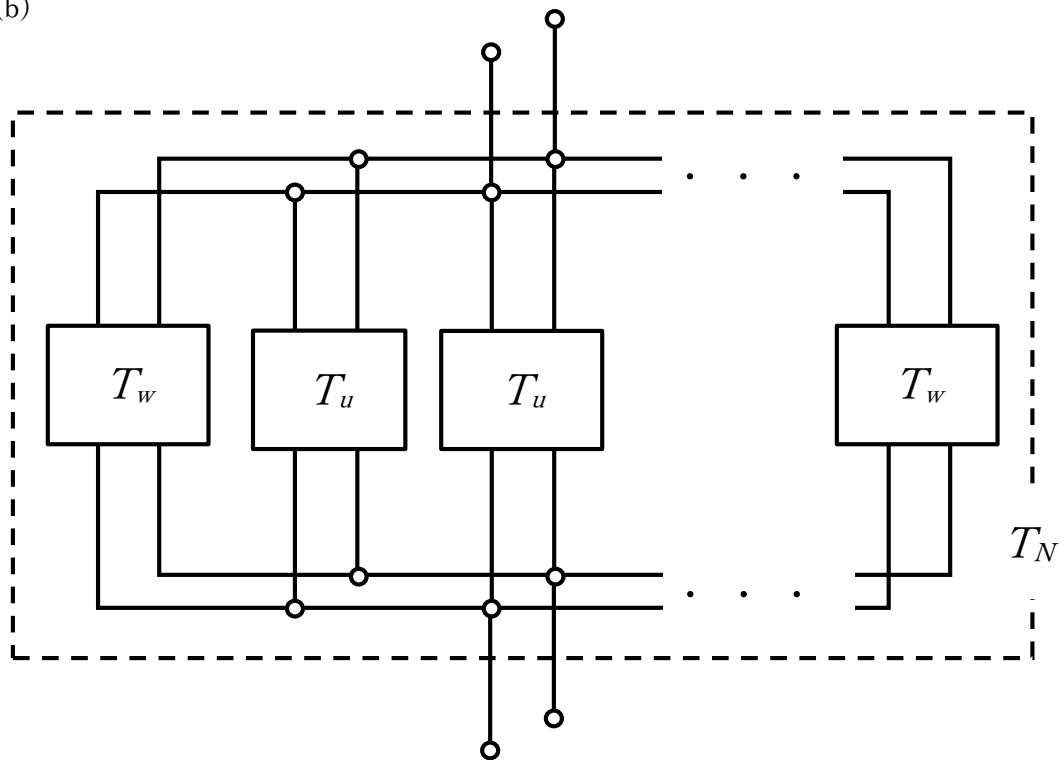


図 6-15 y軸方向へ並列接続した等価回路

(a) T_f と T_w をy軸方向に並列に接続した T_M , (b) T_u と T_w をy軸方向に並列に接続した T_N

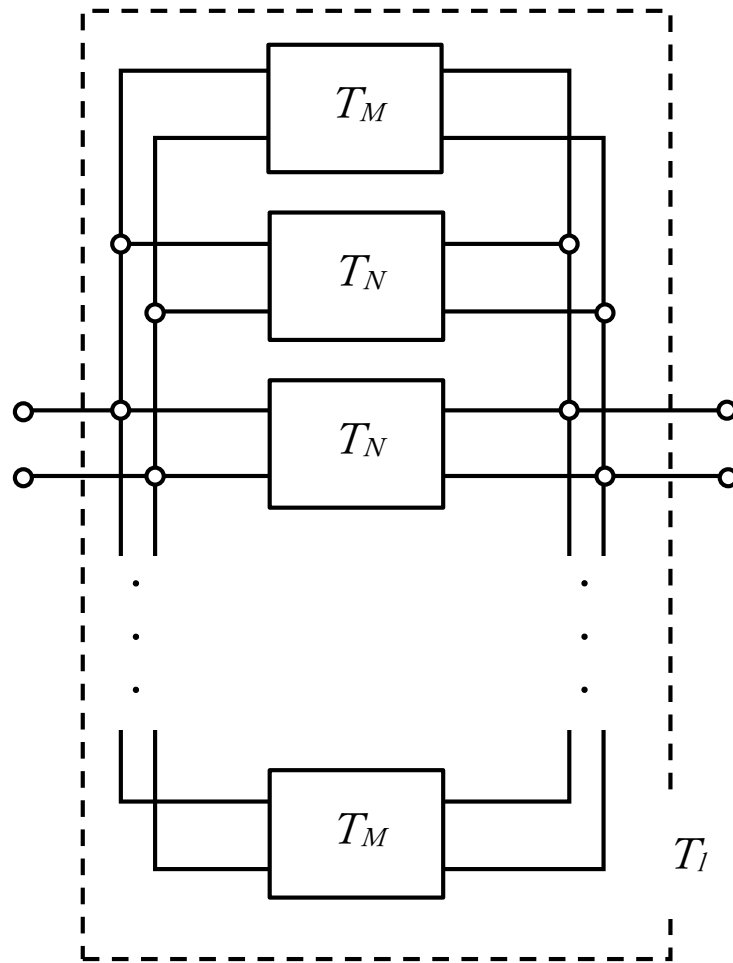


図 6 -16 T_M と T_N をz軸方向へ並列に接続した等価回路(T_I)

6.3.6 網目構造の試料全体の伝達マトリックス

これまでに求めた伝達マトリックスから試料全体の伝達マトリックス T_{all} を求める。前項で求めた yz 面に構成する円柱群1層の伝達マトリックス T_l 、および空気層に相当する伝達マトリックス T_a を接続する。

図6-17に示すように、 T_l と T_a を音波の入射側から縦続接続する事で T_{all} を求める。

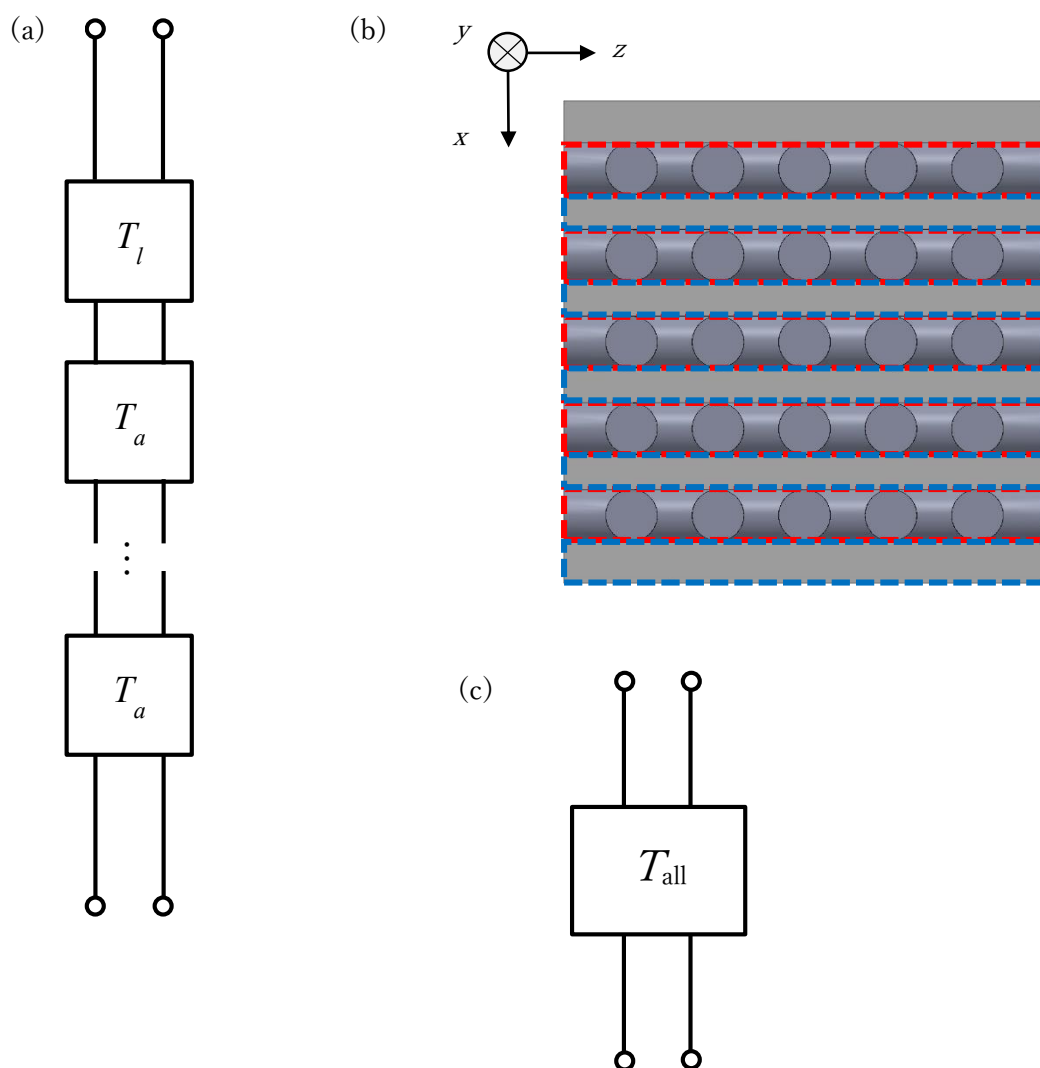


図6-17 試料全体の等価回路

(a) T_l と T_a の縦続接続, (b)試料のモデル図, (c)接続後の伝達マトリックス(T_{all})

6.3.7 吸音率の算出

前項で求めた試料全体の伝達マトリックス T_{all} から吸音率を算出する。吸音率の算出については3.3節や5.6節と同様であり、式(3-10), (3-13), (3-14), (3-15)から比音響インピーダンス Z_0 , 反射率 R を求め、吸音率 α を求める。

6.4 フレーム構造における吸音率の理論解析

6.3節では網目構造の吸音率を算出した。本節ではフレーム構造を対象として吸音率の算出を行う。フレーム構造は網目構造に比べ複雑な部分が増える。

6.4.1 剣山層における解析ユニット

フレーム構造は代表的な2つの層から構成される。図6-18のように x 軸と平行に円柱が配置する層を剣山層, yz 面上で円柱が交差する層を網目層とする。本項では剣山層の空隙部を平行な2平面へ近似する。

図6-19に剣山層の空隙部における平行な2平面への近似例について示す。第4章の内容と同様であり、音波の入射方向に対し、断面の変化がない場合は空隙部と接触する線の周長と空隙部の断面積に着目する。

図6-19において2平面の幅 L_p は各円柱の直径と試料ホルダー内壁の一辺の長さを用いて次式で求められる。

$$L_p = \frac{N_p \pi D_p + 4L_w}{2} \quad (6-14)$$

空隙部の断面積 S_p は次式となる。

$$S_p = L_w^2 - N_p \cdot \frac{\pi}{4} D_p^2 \quad (6-15)$$

2平面間のすきま量 b_p は次式から求められる。

$$b_p = \frac{S_p}{L_p} \quad (6-16)$$

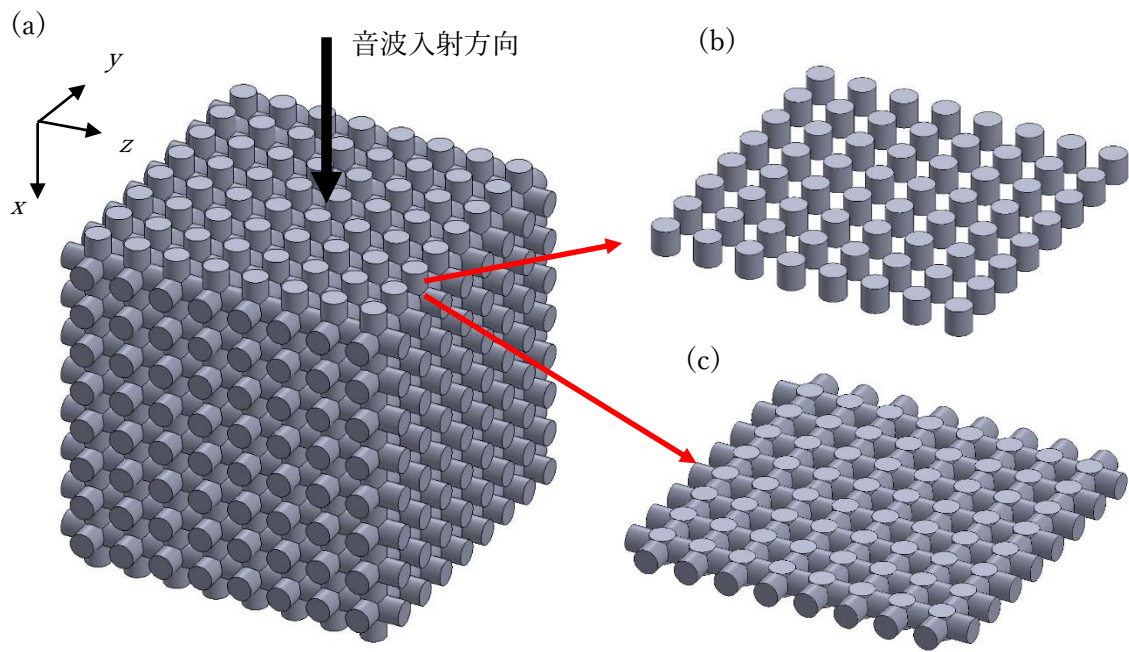


図 6-18 フレーム構造におけるモデル図(a)と剣山層(b)と網目層(c)への分割

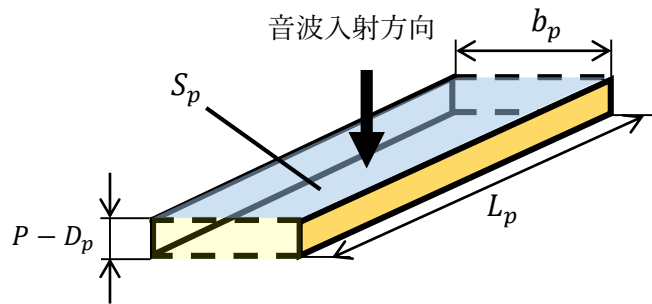
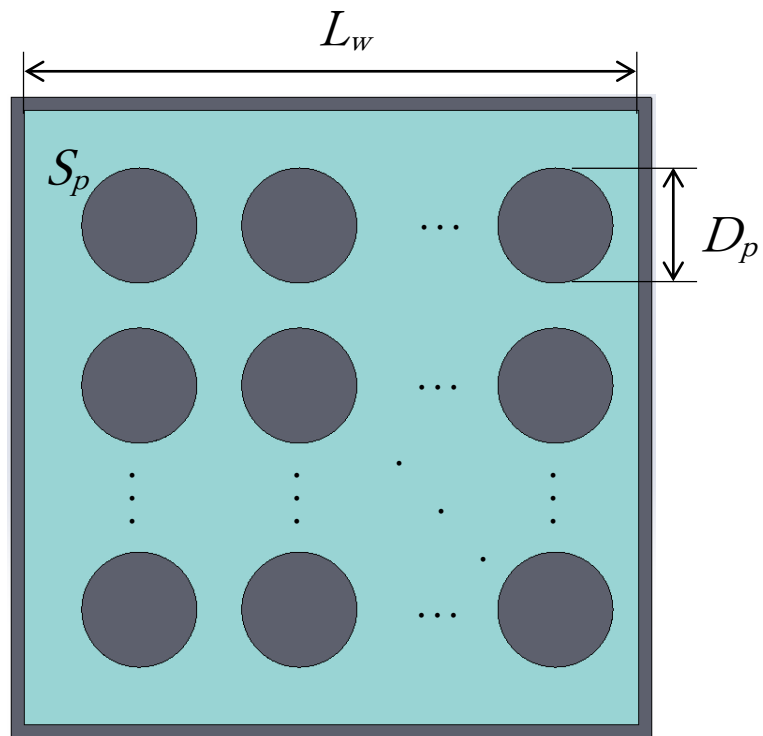


図 6 -19 剣山層の空隙部における平行な 2 平面への近似例

6.4.2 網目層における円柱4本に囲まれた解析ユニット

図6-20に示すように、網目層において4本の円柱に囲まれた空隙部を解析ユニットIVとする。図6-21に示すように解析ユニットIVを上端部と下端部と中間部に分割する。

このうち上端部と下端部は x 軸方向に平行な円柱4本と、 yz 面上の4本の円柱とが交差して構成される。図6-22に示すように上・下端部の空隙部と円柱壁との接触面積 S_{f1} と空隙部の体積 V_{f1} から2平面間のすきま量 b を求められる。なお S_{f1} と V_{f1} は3D-CADを用いて算出した。

$$b = \frac{V_{f1}}{S_{f1}/2} \quad (6-17)$$

解析ユニットIVの中間部は yz 面上に4本の円柱が交差して構成される。音波入射方向に対し、空隙部の断面積が変化する為、6.3.1項で実施した方法を応用する。まず図6-23に示すように解析ユニットIVの中間部を音波入射方向(x 方向)へ n 層に分割する。分割の際、層の厚さが等しくなるように分割する。中間部の厚みが $2r \cos(\pi/4)$ である為、1層あたりの厚さは $2r \cos(\pi/4)/n$ となる。実際の計算では100分割($n = 100$)とした。

中間部の空隙部を n 層に分割した後、分割層における空隙部の体積、空隙と円柱壁との接触面積に着目し、平行な2平面へ近似する。

図6-24に分割された空隙部の任意の層における平行な2平面への近似例を示す。空隙部と1本の円柱の接触面積を S_{f2} とする。図6-25に示すように S_{f2} を構成する円弧の中心角 θ_n は次式で表せる。ここで r は円柱の半径である。

$$\theta_n = \cos^{-1} \left\{ 1 - \left(\frac{x}{r} + \frac{2r \cos \frac{\pi}{4}}{nr} \right) \right\} - \cos^{-1} \left(1 - \frac{x}{r} \right) \quad (6-18)$$

円柱のピッチは P であり、 S_{f2} は次式で求められる。

$$S_{f2} = \int (P - 2r \sin \theta) r d\theta \quad (6-19)$$

中間部の分割層における空隙部の体積 V_{f2} は次式から求められる.

$$V_{f2} = \int (P - 2\sqrt{r^2 - x^2})^2 dx \quad (6-20)$$

図6-24に示すように, 求めた S_{f2} と V_{f2} から2平面間のすきま量 b を求める.

$$b = \frac{V_{f2}}{S_{f2}} \quad (6-21)$$

ここで, 2平面のすきま幅は分割層の厚さ $2r \cos(\pi/4)/n$ に等しい.

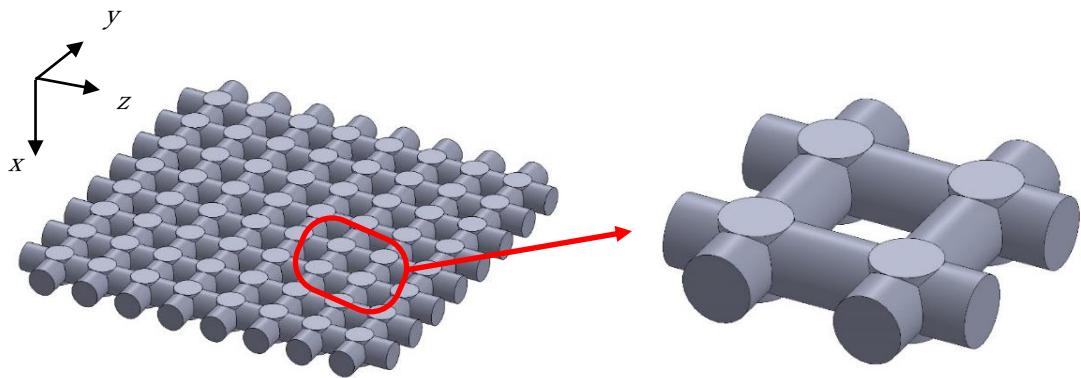


図 6 -20 網目層(1層)のモデルと解析ユニットIV

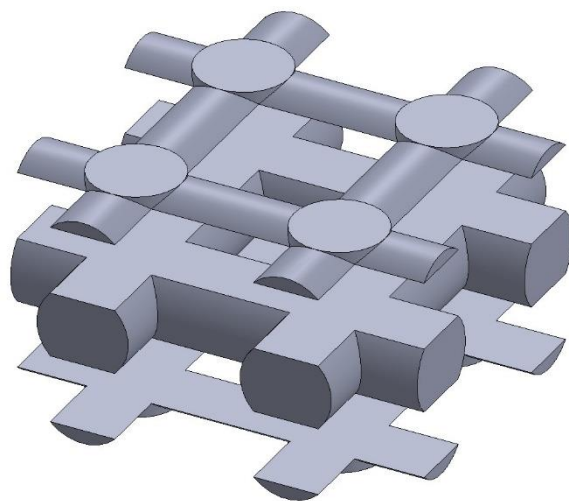


図 6 -21 解析ユニットIVにおける上端部, 中間部, 下端部

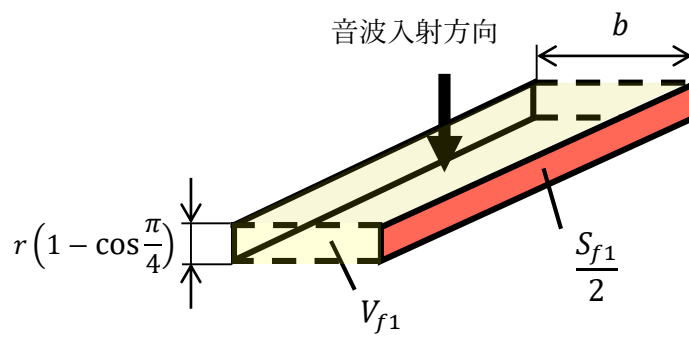
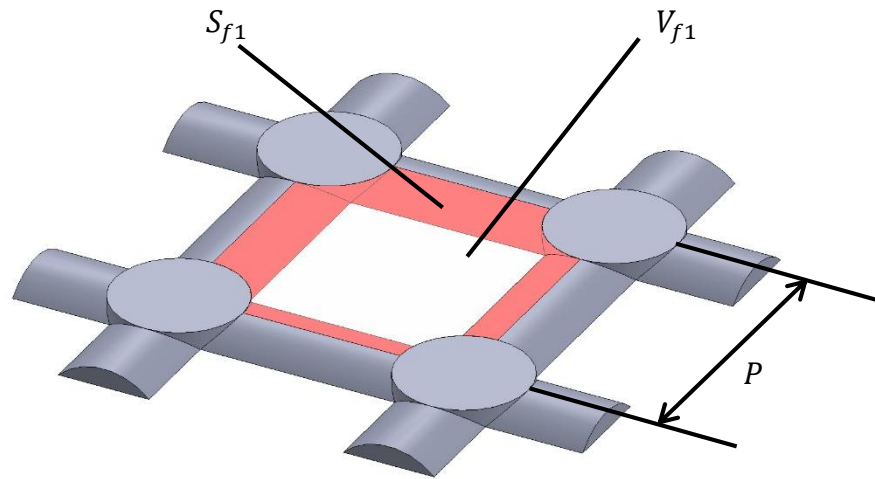


図 6-22 解析ユニットIVの上・下端部における平行な2平面への近似

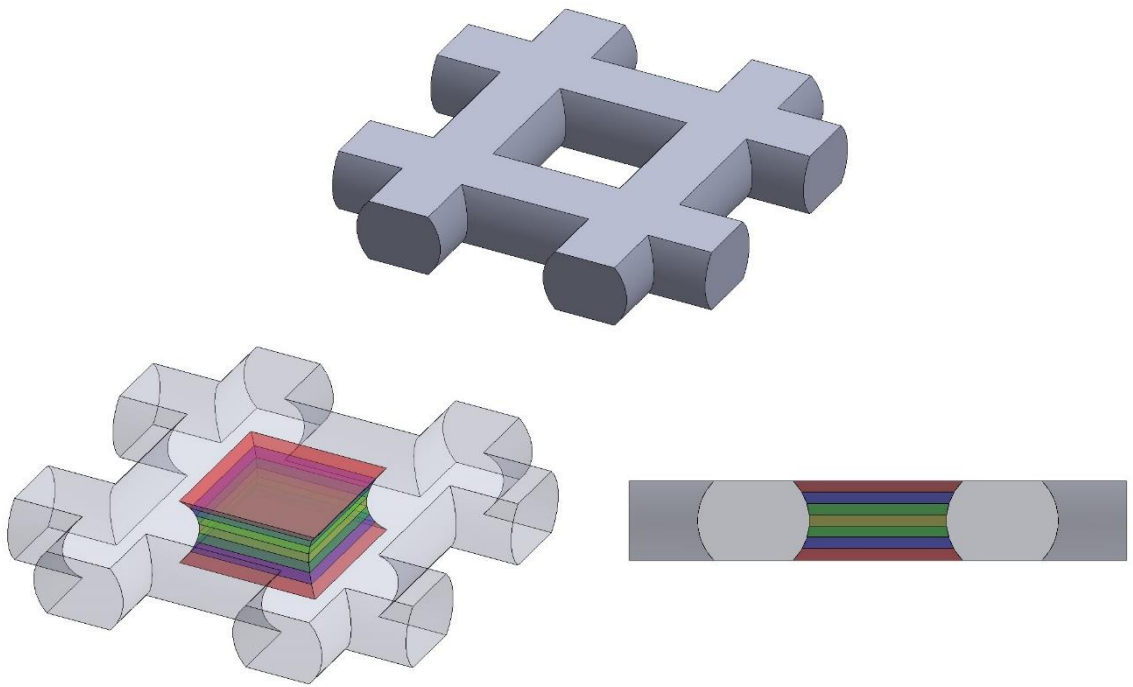


図 6-23 解析ユニットIVの中間部における空隙部の層分割

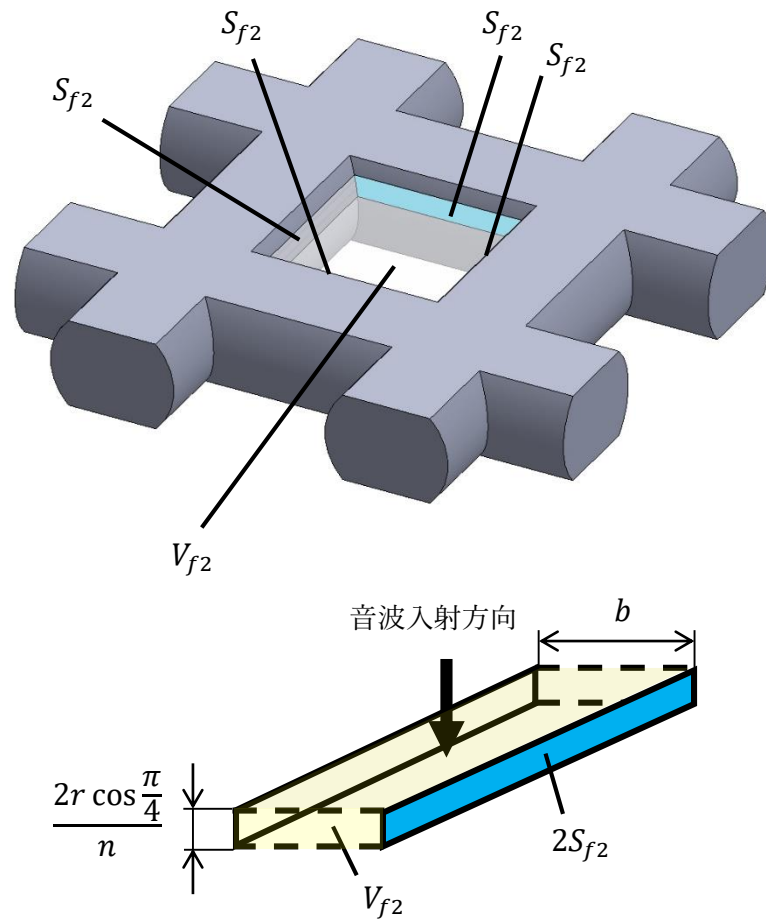


図 6-24 解析ユニットIVの中間部の分割層における平行な2平面への近似例

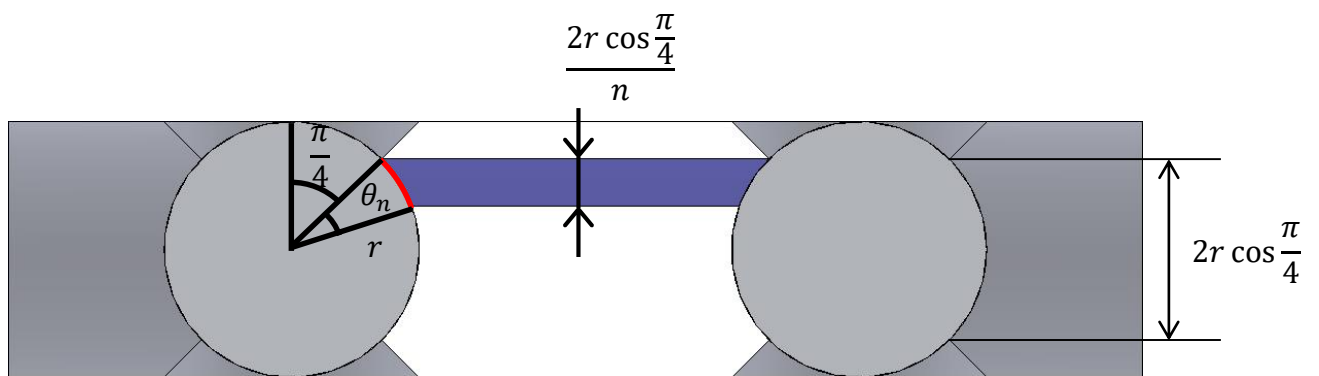


図 6-25 接触面積 S_{f2} を構成する円弧

6.4.3 円柱3本と試料ホルダー内壁に囲まれた解析ユニット

本項では図6-26に示す、円柱3本と試料ホルダー内壁に囲まれた空隙部である解析ユニットVを対象とする。

図6-27に示すように解析ユニットVを上端・下端部と中間部に分割する。図6-28において空隙部と関連する壁面との接触面積 S_{f3} と空隙部の体積 V_{f3} によって2平面間のすきま量 b は次式で表せる。なお実施に際しては S_{f3} と V_{f3} を3D-CADを用いて算出した。

$$b = \frac{V_{f3}}{\frac{S_{f3}}{2}} \quad (6-22)$$

解析ユニットVの中間部については、解析ユニットIVと同様に空隙部を音波入射方向へ n 層に分割する。図6-29は分割した層における平行な2平面への近似例であり、側面積 S_{f2} は解析ユニットIVと同様に式(6-19)から求める。試料ホルダーに突き当たる円柱の側面積 S_{f4} は次式から求められる。ここで r は円柱の半径である。

$$S_{f4} = \int \left\{ \frac{L_t - (\sqrt{N_p} - 1)P}{2} - r \sin \theta \right\} r d\theta \quad (6-23)$$

試料ホルダーと空隙部の接触面積 S_{f5} は次式で表せる。 A_{ar} は式(6-7)によって求める。

$$S_{f5} = \frac{2r \cos \frac{\pi}{4}}{n} \times P - 2A_{ar} \quad (6-24)$$

図6-29から分割した空隙部の体積 V_{f4} は次式から求められる。

$$V_{f4} = \int \left\{ \frac{L_t - (\sqrt{N_p} - 1)P}{2} - \sqrt{r^2 - x^2} \right\} (P - 2\sqrt{r^2 - x^2}) dx \quad (6-25)$$

ここまでに求めた V_{f4} 、 S_{f2} 、 S_{f4} 、 S_{f5} から近似した平行な2平面間のすきま量 b は次式によって求められる。

$$b = \frac{V_{f4}}{\frac{S_{f2} + 2S_{f4} + S_{f5}}{2}} \quad (6-26)$$

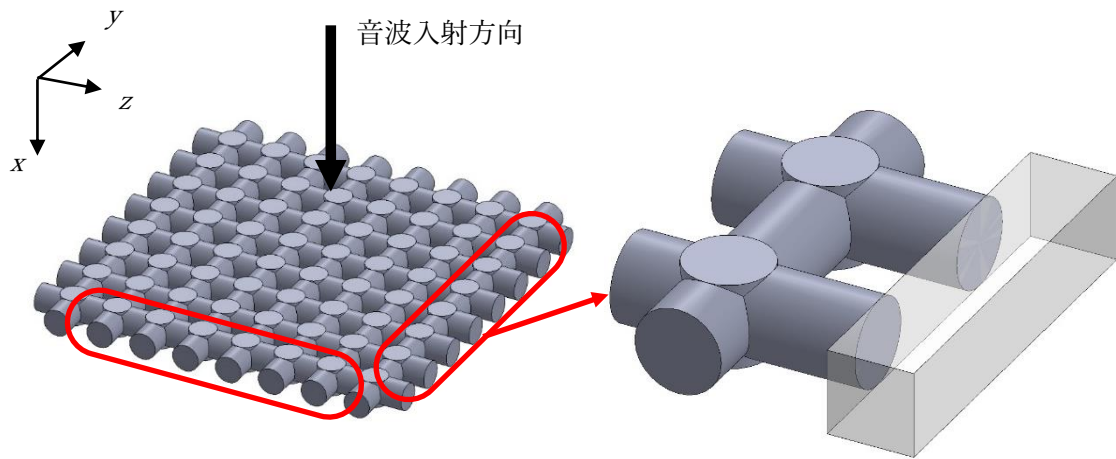


図 6-26 網目層のモデルと解析ユニット V

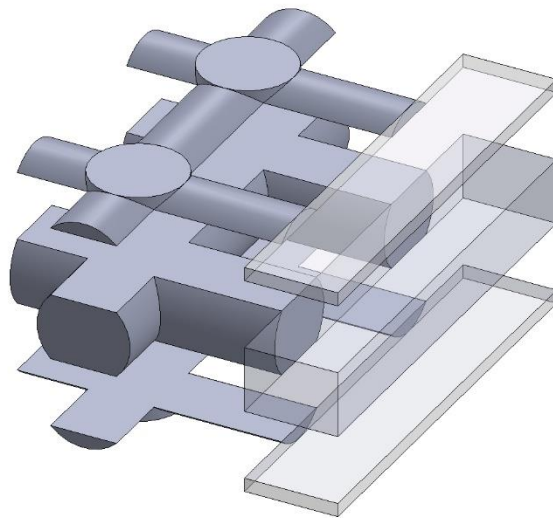


図 6-27 解析ユニット V における上・下端部と中間部への分割

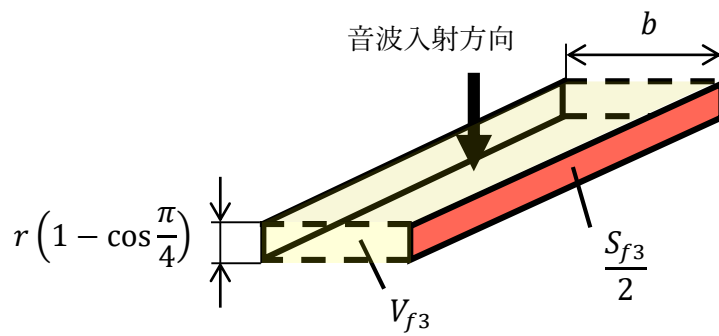
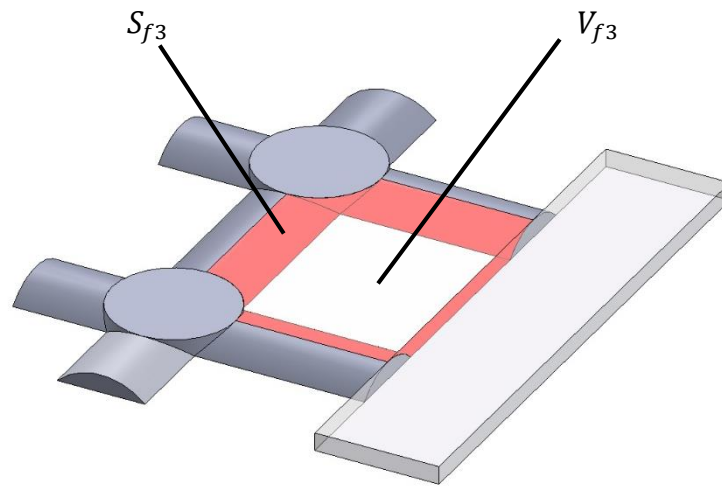


図 6-28 解析ユニット V の上・下端部における平行な 2 平面への近似

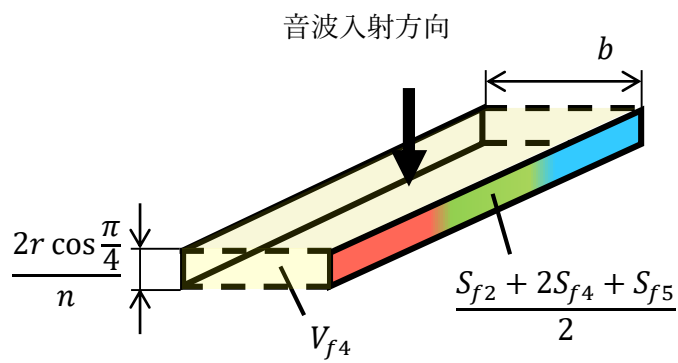
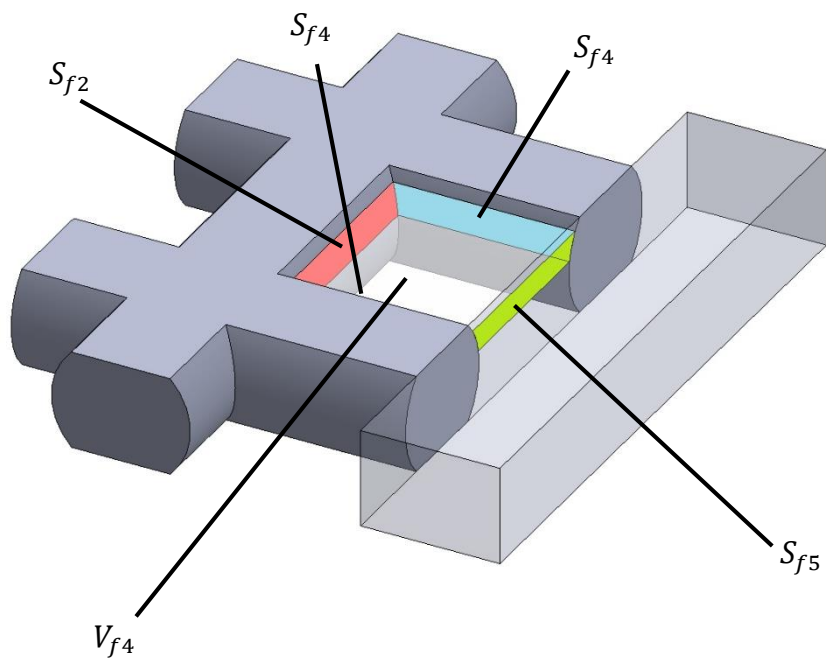


図 6-29 解析ユニット V の中間部の分割層における平行な 2 平面への近似例

6.4.4 円柱 2 本と試料ホルダー内壁 2 面に囲まれた解析ユニット

本項では円柱 2 本と試料ホルダー内壁 2 面に囲まれた解析ユニット VI について扱う。図 6-30 に網目層における解析ユニット VI について示す。

図 6-31 に示すように解析ユニット VI を上・下端部と中間部に分割する。図 6-32 において空隙部と周辺壁面との接触面積 S_{f6} と空隙部の体積 V_{f5} から近似した 2 平面間のすきま量 b は次式で表せる。実際の実施には S_{f6} と V_{f5} を 3D-CAD を用いて算出した。

$$b = \frac{V_{f5}}{\frac{S_{f6}}{2}} \quad (6-27)$$

解析ユニット VI の中間部については、解析ユニット IV、V と同様に空隙部を音波入射方向へ n 層に分割する。図 6-33 は分割した層における平行な 2 平面への近似例である。空隙部と円柱との接触面積 S_{f4} は解析ユニット V と同様の式 (6-23) から求める。試料ホルダー内壁と空隙部の接触面積 S_{f5}' は次式で表せる。ここで A_{ar} は式 (6-7) から求める。 r は円柱の半径である。

$$S_{f5}' = \frac{2r \cos \frac{\pi}{4}}{n} \times \frac{L_t - (\sqrt{N_p} - 1)P}{2} - A_{ar} \quad (6-28)$$

図 6-33 から空隙部の体積 V_{f6} は次式から求められる。 L_t は試料ホルダーの一辺の長さであり、 $L_t = 25.7\text{mm}$ である。

$$V_{f6} = \int \left\{ \frac{L_t - (\sqrt{N_p} - 1)P}{2} - \sqrt{r^2 - x^2} \right\}^2 dx \quad (6-29)$$

これまでに求めた V_{f6} 、 S_{f4} 、 S_{f5}' から 2 平面間のすきま量 b が次式から求められる。

$$b = \frac{V_{f6}}{S_{f4} + S_{f5}'} \quad (6-30)$$

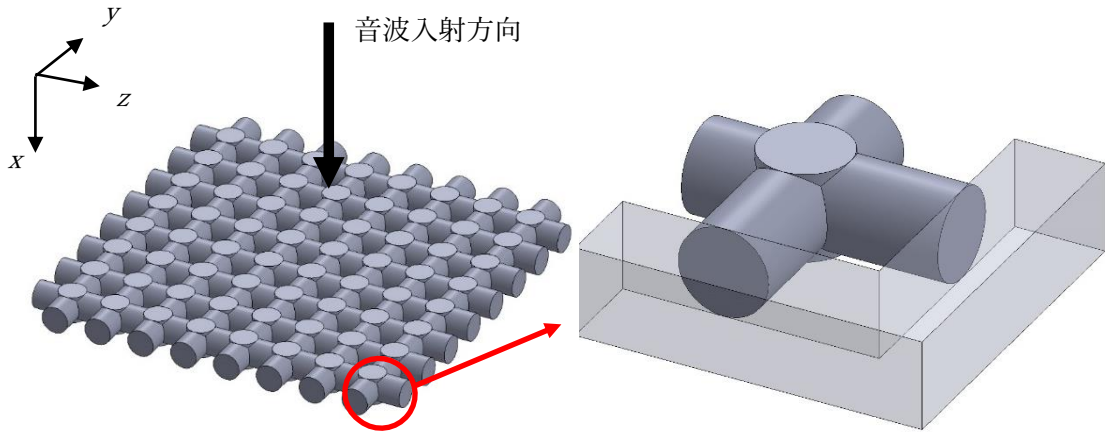


図 6 -30 網目層と解析ユニットVI

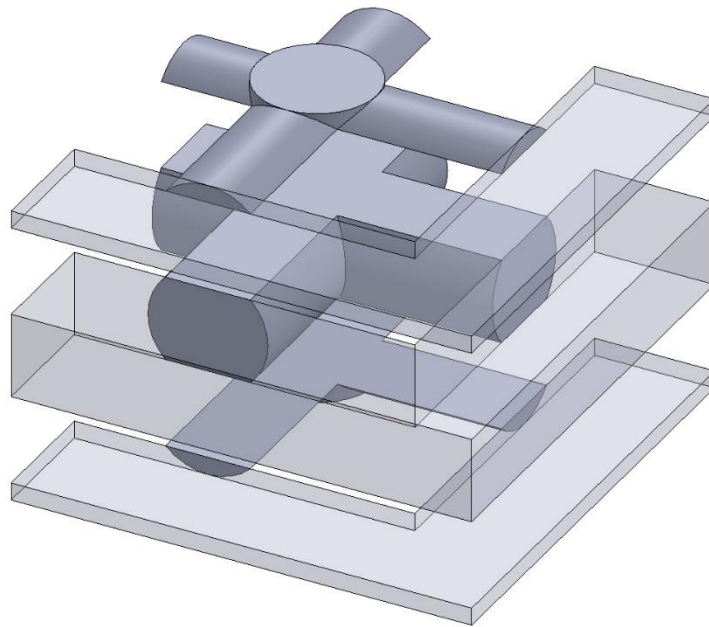


図 6 -31 解析ユニットVIにおける上・下端部と中間部への分割

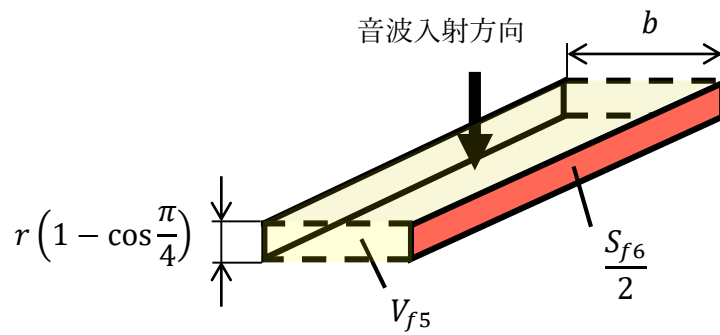
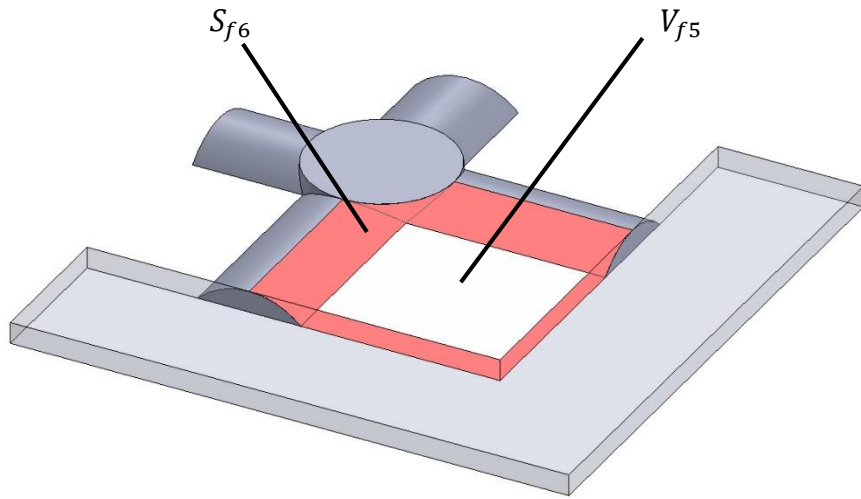


図 6-32 解析ユニット VI の上・下端部における平行な 2 平面への近似

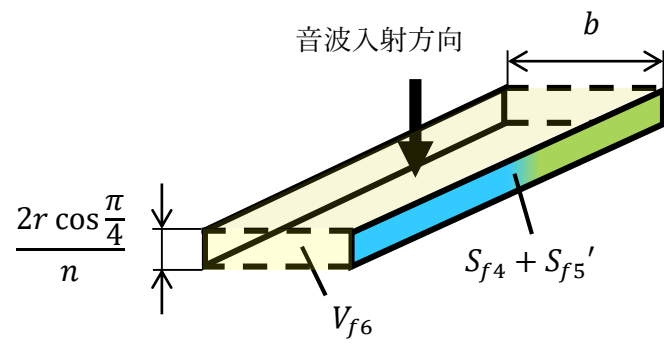
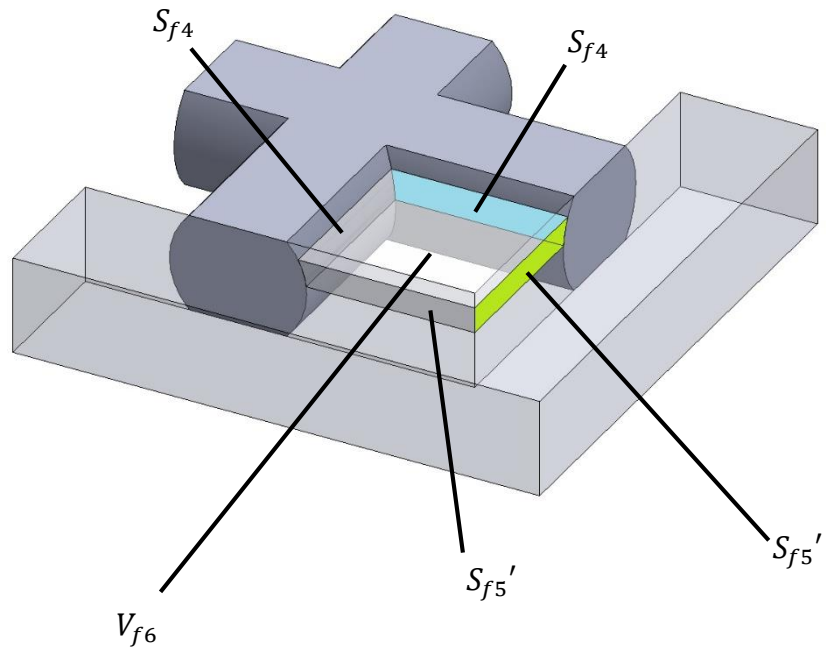


図 6-33 解析ユニットVIの中間部の分割層における平行な2平面への近似例

6.4.5 剣山層の伝達マトリックス

本項では6.4.1項で扱った剣山層の伝達マトリックスを求める。式(6-16)で求めた2平面間のすきま量と式(3-20), (3-21)から剣山層としての伝搬定数と特性インピーダンスを算出する。求めた伝搬定数と特性インピーダンスを式(3-2)にあてはめる事で伝達マトリックスを求める。求めた剣山層の伝達マトリックスを T_p とする。

6.4.6 網目層の解析ユニットにおける伝達マトリックス

本項では6.4.2～6.4.4項で求めた解析ユニットIV, V, VIの分割層における2平面間のすきま量から、解析ユニットとしての伝達マトリックスを算出する。

分割した層における2平面間のすきま量と式(3-20), 式(3-21)から分割層としての伝搬定数と特性インピーダンスを求める。求めた伝搬定数と特性インピーダンスを式(3-2)に当てはめる事で分割層ごとの伝達マトリックスを求める。

各解析ユニットの上端部・下端部の伝達マトリックスを T_s , 中間部の分割層ごとの伝達マトリックスを音波の入射側から $T_1, T_2 \dots T_n$ とする。

図6-34に示すように, T_s と $T_1, T_2 \dots T_n$ を縦続接続する事により各解析ユニット単位での伝達マトリックスを求める。ここで, 4本の円柱に囲まれた解析ユニットIVの伝達マトリックスを T_u , 3本と試料ホルダー内壁に囲まれた解析ユニットVを T_w , 2本の円柱と試料ホルダー内壁2面に囲まれた解析ユニットVIを T_f とする。

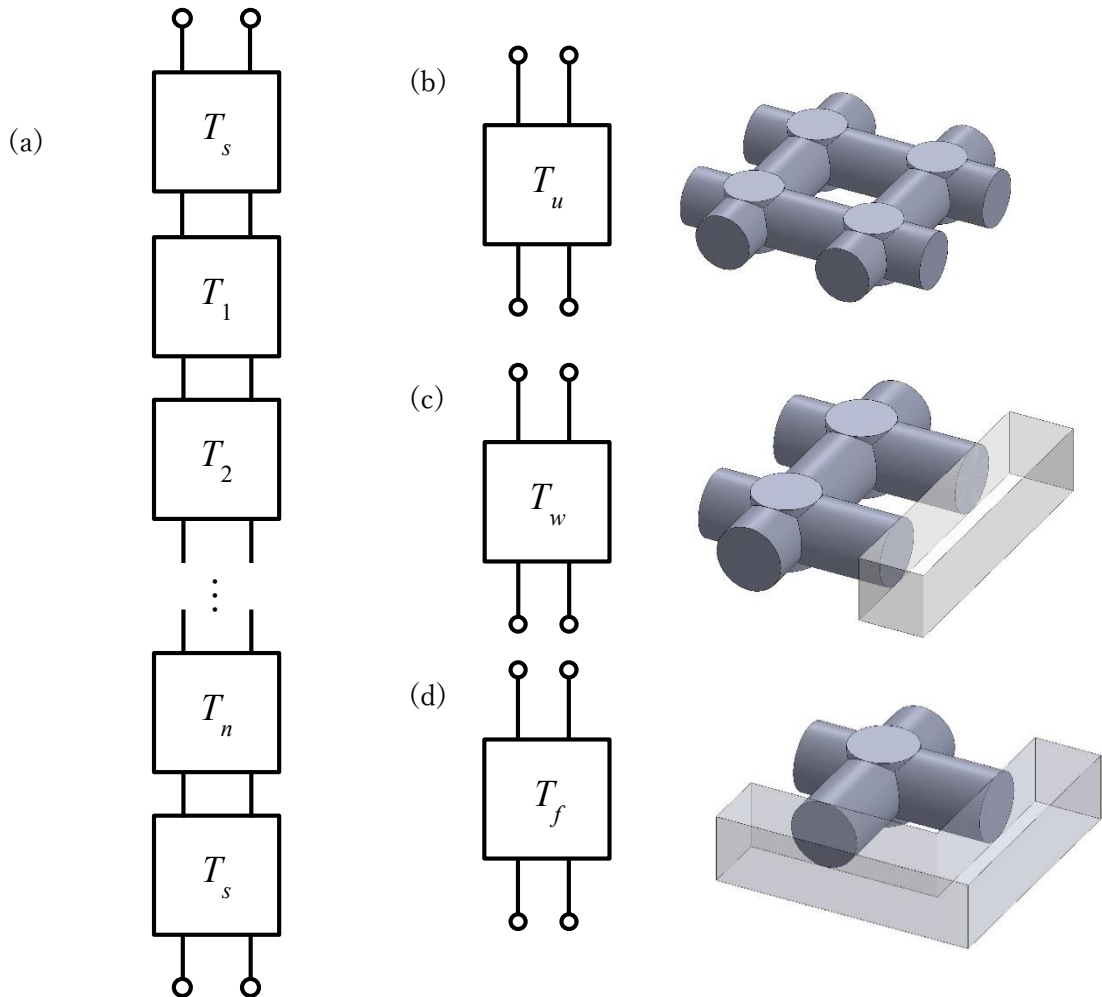


図 6-34 解析ユニットの等価回路

- (a)上端部・中間部・下端部の縦続接続, (b)接続後の解析ユニットIV(T_u)
(c)接続後の解析ユニットV(T_w), (d)接続後の解析ユニットVI(T_f)

6.4.7 網目層の伝達マトリックス

本項では、前項で求めた各解析ユニットの伝達マトリックスから網目層の伝達マトリックスを求める。各解析ユニットをyz面へ並列に接続する。実際にはy軸方向へ接続後、z軸

方向に接続した。

図 6-35 と図 6-36 に示すように T_u , T_w , T_f を並列に接続する事で y 軸方向単位の伝達マトリックス T_M , T_N を求める。 T_M を算出の際は T_w が, T_N を算出の際は T_u が, y 軸上に配置される円柱の数よりも 1 つ分少なくなる。

求めた T_M , T_N を図 6-37 に示すように z 軸方向へ並列に接続し, 網目層の伝達マトリックス T_l を求める。 T_l を算出の際は T_N が z 軸に配置される円柱の数よりも 1 つ分少なくなる。

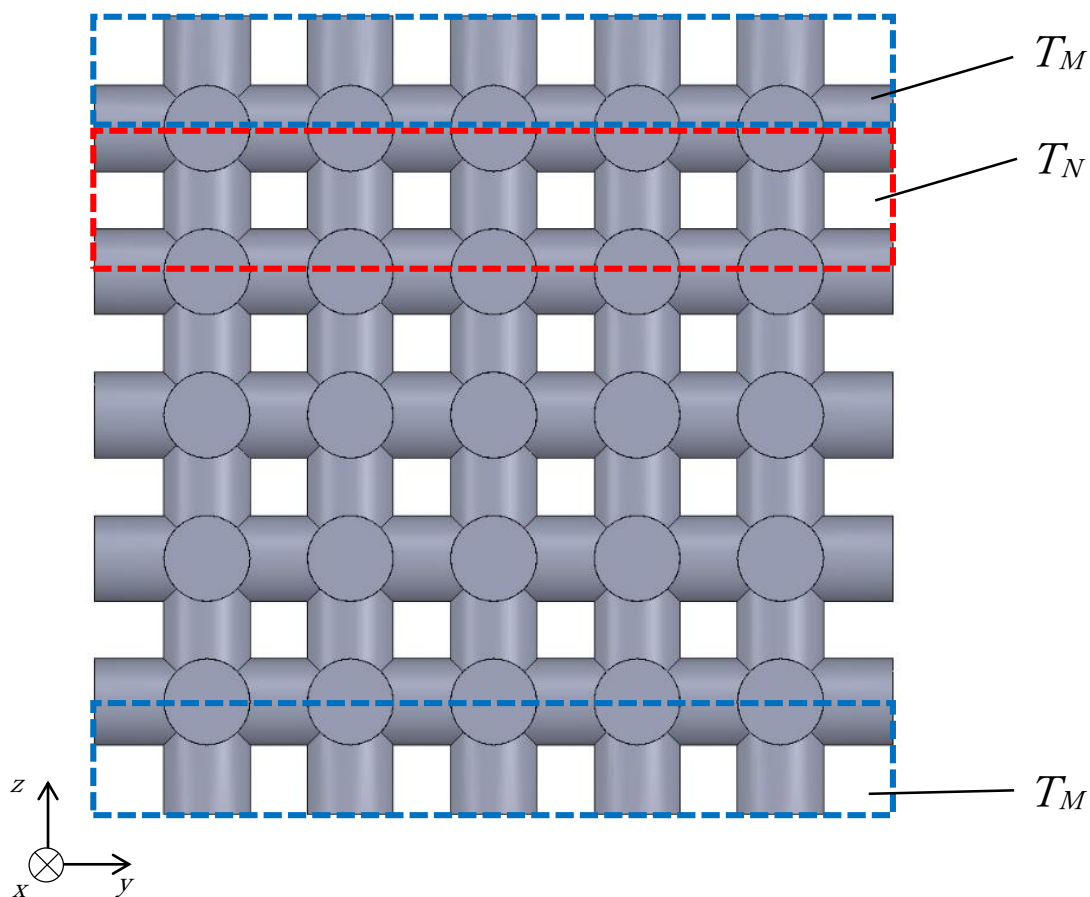


図 6-35 網目層のモデル図

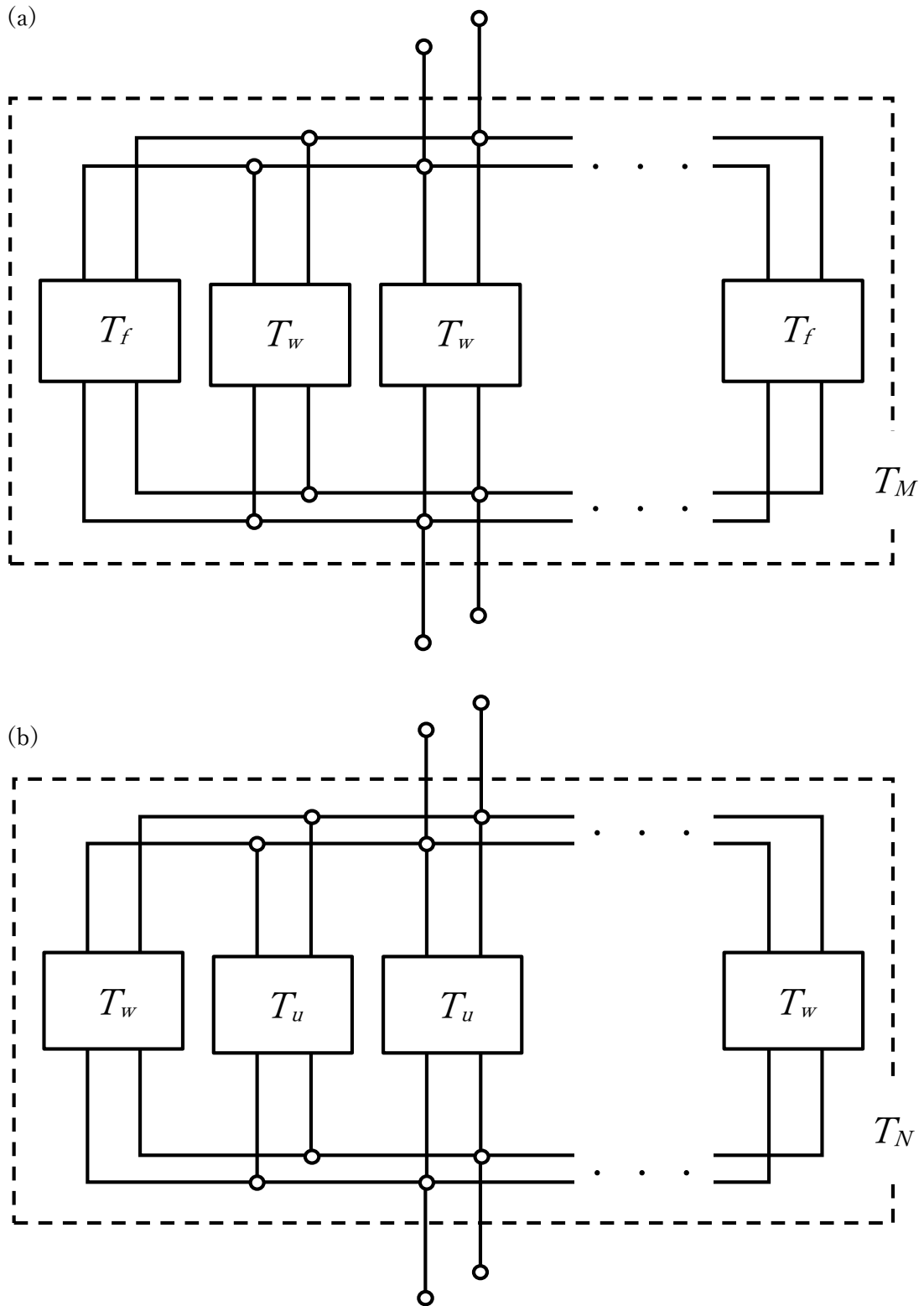


図 6-36 y 軸方向へ並列接続した等価回路
 (a) T_f と T_w の並列接続(T_M), (b) T_w と T_u の並列接続(T_N)

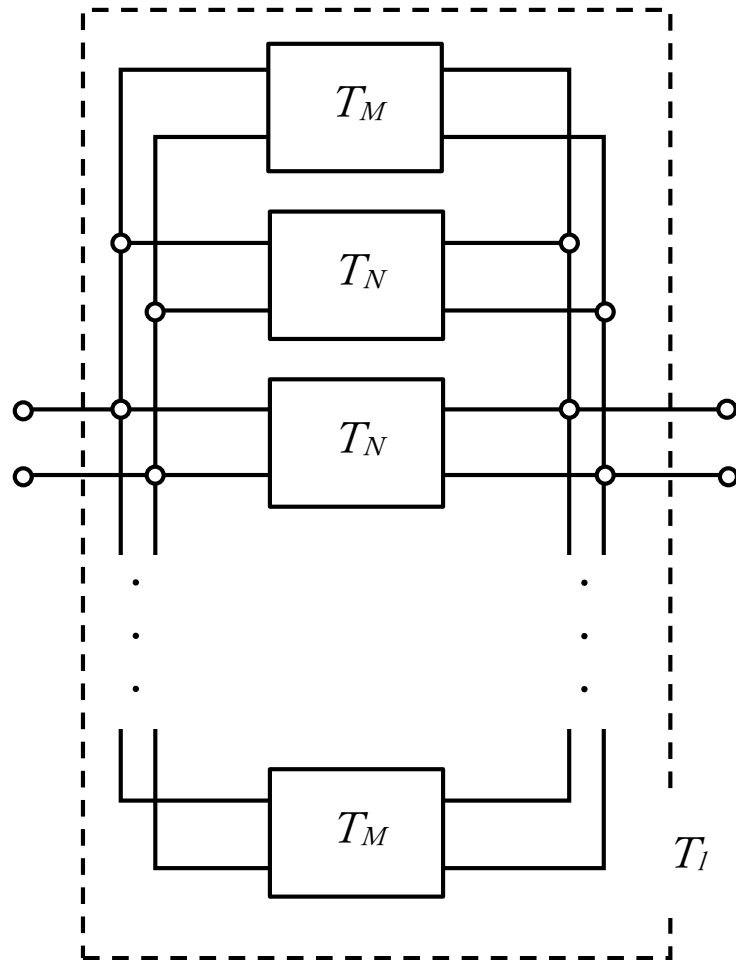


図 6 -37 T_M , T_N をz軸方向へ並列接続した等価回路(T_l)

6.4.8 試料全体の伝達マトリックス

最後に試料全体の伝達マトリックスを算出する． 6.4.5項で求めた剣山層の伝達マトリックス T_p と6.4.7項で求めた網目層の伝達マトリックス T_l を接続する．

図6-38に示すように音波の入射側から T_p と T_l を縦続接続することにより，試料全体の伝達マトリックス T_{all} を算出する．

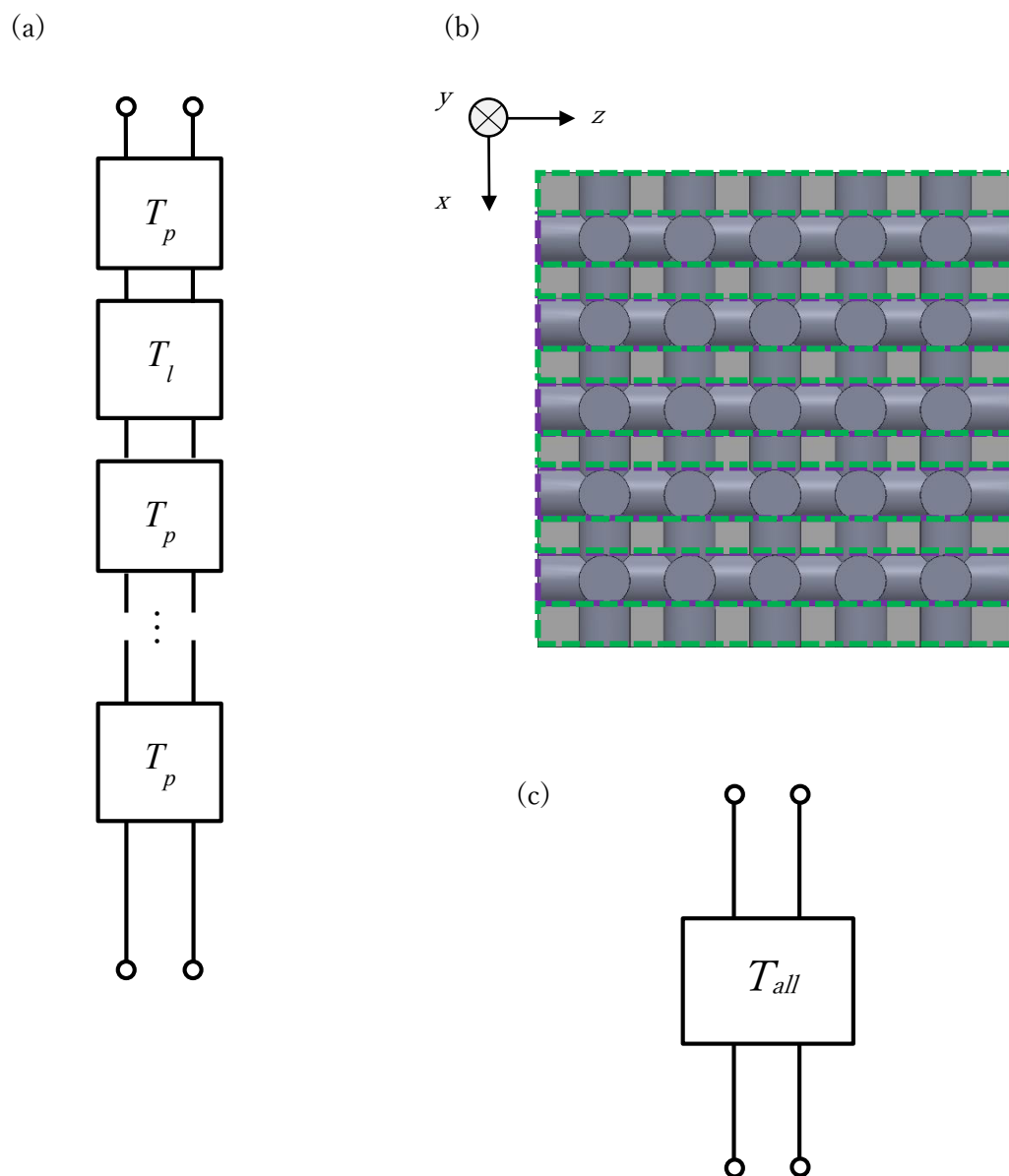


図6-38 試料全体の等価回路

(a) 剣山層 T_p と網目層 T_l の縦続接続，(b) 試料モデル図

(c) 接続後の試料全体の伝達マトリックス T_{all}

6.4.9 吸音率の算出

前項で求めた試料全体の伝達マトリックス T_{all} を用いて吸音率を算出する。吸音率の算出については3.3節, 5.6節や6.3.7項と同様であり, 式(3-10), (3-13), (3-14), (3-15)から比音響インピーダンス Z_0 , 反射率 R を求め, 吸音率 α を得る。

6.5 実験結果

本節では各試料における吸音率について実験結果と数理モデルによる理論解析の比較を行う。

図6-39に網目構造の円柱間ピッチ $P=3.5\text{mm}$, 円柱直径 $D_p=2.3\text{mm}$, 2.5mm の実験結果と理論解析結果を示す。図6-40に網目構造の円柱間ピッチ $P=4.2\text{mm}$, 円柱直径 $D_p=2.8\text{mm}$, 3.0mm の実験結果と理論解析結果を示す。

図6-41にフレーム構造の円柱間ピッチ $P=3.5\text{mm}$, 円柱直径 $D_p=2.3\text{mm}$, 2.5mm の実験結果と理論解析結果, 図6-42にフレーム構造の円柱間ピッチ $P=3.5\text{mm}$, 円柱直径 $D_p=2.3\text{mm}$, 2.5mm の実験結果と理論解析結果を示す。

実験結果と解析結果を比較すると, 吸音率の周波数特性において解析結果と実験結果は近い傾向を示している。特に吸音率のピークとなる周波数は精度よく推定された。吸音率の値は解析結果が実験よりも低くなる傾向であるが, 試料間の定性的な関係は一致した。

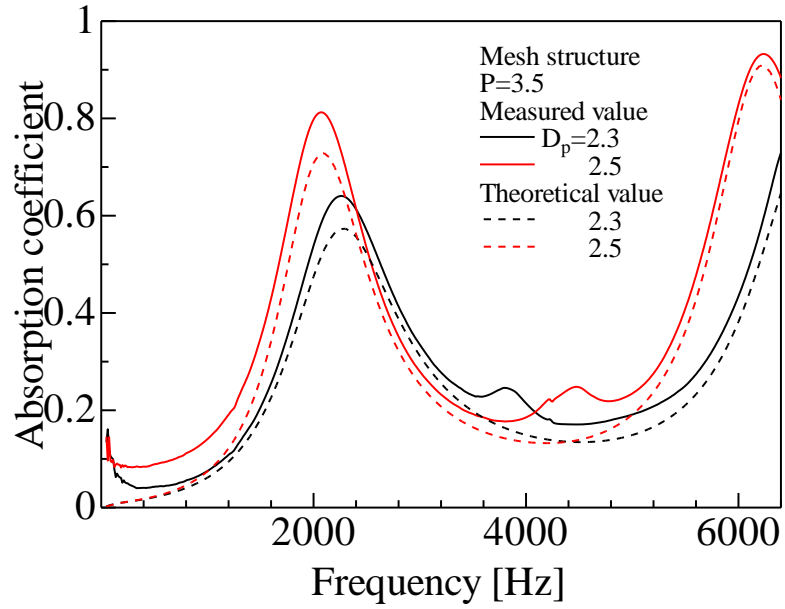


図 6 -39 網目構造の円柱間ピッチ $P3.5\text{mm}$ の実験結果と理論解析結果

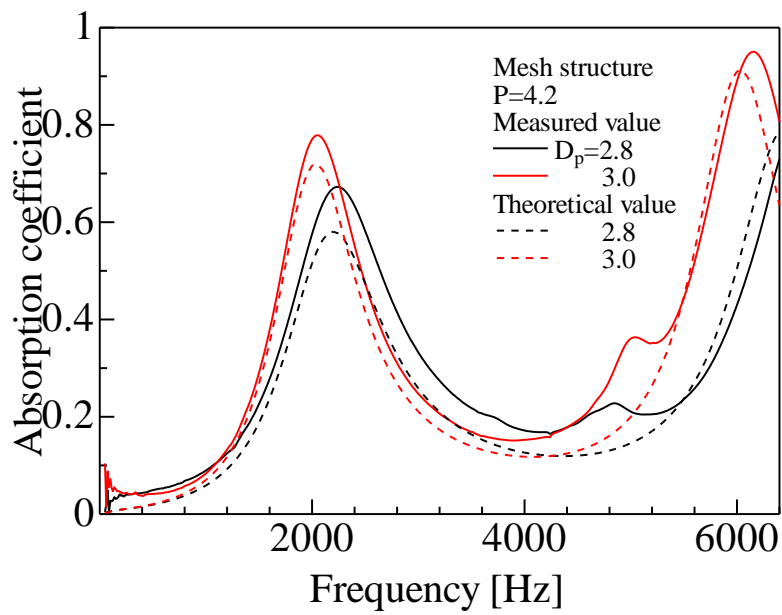


図 6 -40 網目構造の円柱間ピッチ $P4.2\text{mm}$ の実験結果と理論解析結果

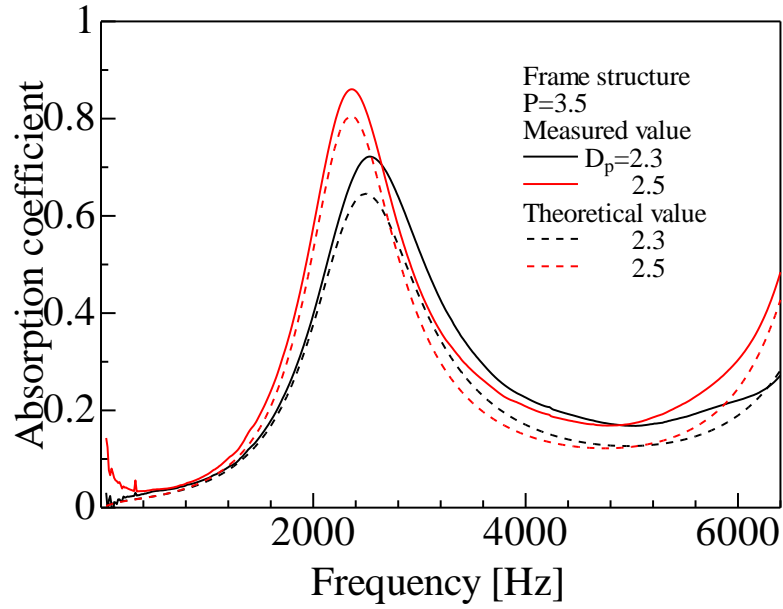


図 6 -41 フレーム構造の円柱間ピッチ $P3.5\text{mm}$ の実験結果と理論解析結果

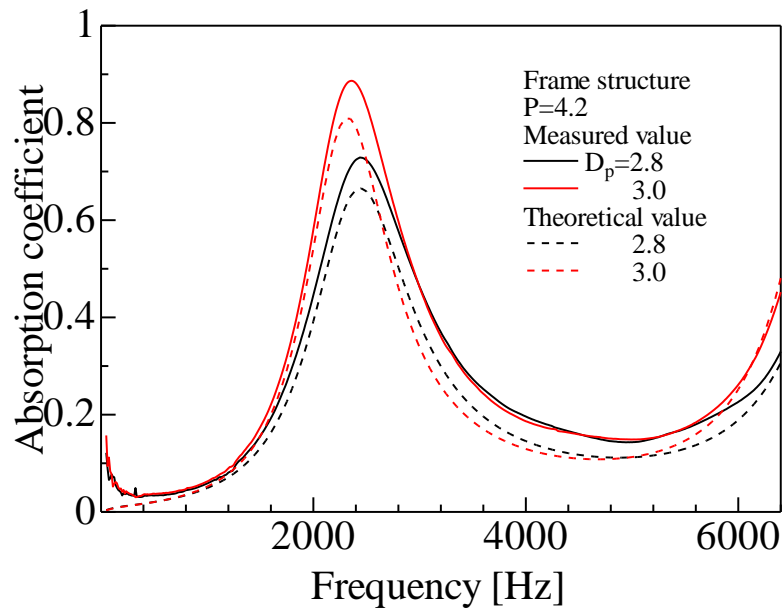


図 6 -42 フレーム構造の円柱間ピッチ $P4.2\text{mm}$ の実験結果と理論解析結果

6.6 構造間の吸音特性比較

本節では、第4章から本章までに扱った構造の吸音特性について各構造の特徴を比較する。図6-43に各章で扱った構造の実験結果と解析結果を示す。構造間の諸元を近いものとする為、円柱間ピッチ P を3.5mmのものとした。剣山状構造の入射方向による差異については5.8節で述べた通りである。ここでは図6-43(b)を横剣山と呼称し、横剣山、網目構造、フレーム構造について比較する。

横剣山に比べ、網目・フレーム構造の方が吸音率のピークが高い。横剣山は音波入射方向に対し、円柱層と空隙層が混在する事が吸音効果を高めると考えられ、その効果は網目・フレーム構造も同様である。網目・フレーム構造は空隙部と接触する壁面が増加する事でより粘性抵抗が高くなると考える。網目構造とフレーム構造では剣山層の存在によりフレーム構造の方が空隙部と壁面との接触面積が増加し、粘性抵抗により吸音率が高くなる。吸音率のピークを示す周波数は網目構造が最も低い。音波が進行する経路の複雑さがピークの周波数に寄与すると考えることから、網目構造が最も音波の経路を複雑にしていると考えられる。

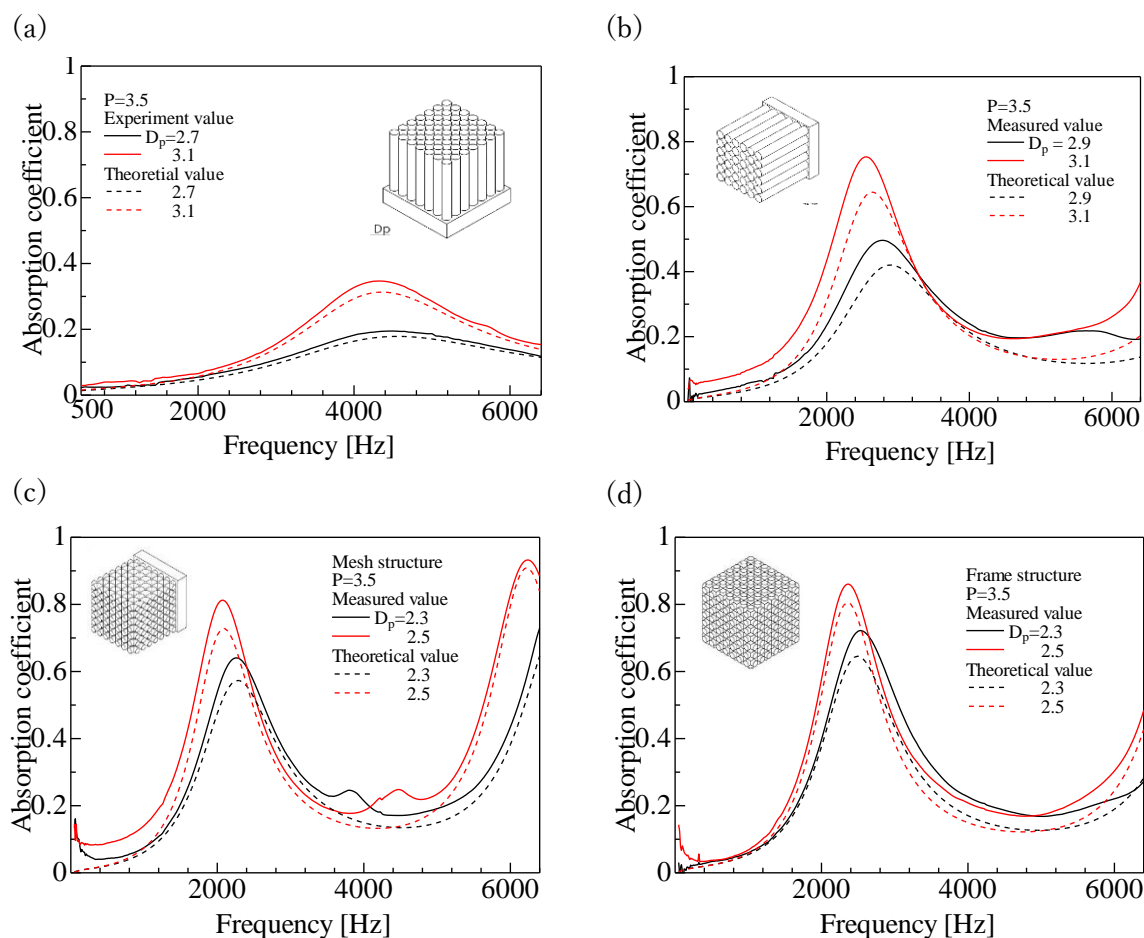


図6-43 各構造における吸音率の実験/理論解析結果

(a) 剣山状構造(第4章), (b) 横剣山(第5章), (c) 網目構造, (d) フレーム構造

6.7 結言

網目構造とフレーム構造について、吸音特性を推定する理論解析を試み、数理モデルを構築した。網目構造においては音波の入射方向に対し、音響媒体の断面が変化する上、空隙部と接触する壁面との関係が複雑であり、それらを考慮した数理モデルを実現した。

数理モデルの内容としては、対象の構造を代表的な解析ユニットに分割し、さらに各解析ユニットを複数の層に分割した。分割した層を平行な2平面へ近似し、層ごとの伝達マトリックスを求めた。

層ごとの伝達マトリックスを基に、縦続、並列接続を組合せる事で試料全体の伝達マトリックスを求めた。試料全体の伝達マトリックスから伝搬定数と特性インピーダンスを求め、吸音率を算出した。

実験結果と数理モデルによる解析結果とを比較した結果、吸音率に関する全体的な周波数特性において両者は近い傾向を示した。特に吸音率のピークとなる周波数は精度良く推定された。吸音率の値としては解析結果の方が低くなる傾向であるが、試料間の定性的な関係は一致し、構築した数理モデルが有用である事を示した。

本研究で扱った4種類の構造について吸音特性を比較した。構造が複雑になる事で吸音効果が高くなる傾向が確認された。

フレーム構造の数理モデルについては理論解析の過程で3D-CADを利用しており、緒論で述べたような構想段階で吸音特性を推定する際には不向きである。本章の実験結果より、網目構造とフレーム構造では類似した吸音特性が得られていることから、網目構造の数理モデルにて構想を立て、その結果をもとにフレーム構造の実形状を具現化する事で構想検討が可能となる。また、網目構造の数理モデルにおいて空隙層を剣山層に置き換えて利用する事も可能と考える。

6.8 参考文献

- [1] 赤嶺孝太, 坂本秀一, 佐藤隆政, 宇内俊介, 磯部卓功, フォーム吸音材に関する基礎的研究(ラーメン構造の吸音率の理論的推定と実験), 日本機械学会北陸信越支部 第56期総会・講演会講演論文集, No. 197-1, Paper No. K012 (2019. 3. 2), 富山大, 4 pages.
- [2] 飯塚健太, 坂本秀一, 佐藤隆政, 田崎克彦, 新田勇, 水野千尋, 網目構造に関する吸音率の理論的推定と実験, 日本機械学会北陸信越支部 2022年合同講演会講演論文集, No. 227-1, Paper No. C032 (2022. 3. 5), 金沢工大, 5 pages.

- [3] 宇内俊介, 坂本秀一, 佐藤隆政, 磯部卓功, 飯塚健太, 剣山構造に関する吸音率の理論的推定と実験 (円柱の軸方向に対して音波が垂直に入射する場合), 日本機械学会北陸信越支部 第 57 期総会・講演会講演論文集, No. 207-1, Paper No. I012 (2020. 3. 8), 長岡技大, 4 pages.
- [4] 磯部卓功, 坂本秀一, 佐藤隆政, 飯塚健太, 田崎克彦, 規則的に配列した円柱群の側面に入射する吸音率の理論的推定と実験(空隙部分の体積と曲面の面積を考慮した解析), 日本機械学会北陸信越支部 第 58 期総会・講演会講演論文集, No. 217-1, Paper No. C013 (2021. 3. 6), 信州大, 5 pages.
- [5] Takamasa Satoh, Shuichi Sakamoto, Isami Nitta, Shunsuke Unai, Takunari Isobe, Kenta Iizuka, Katsuhiko Tasaki, Estimation and experimental test of the sound-absorption coefficient of a pin-holder structure (Case of sound waves incidence upon the side surfaces of a group of cylinders), Proceedings of INTER-NOISE 2021 (50th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering), Washington, DC, U. S. A., Paper No. 2497, 6 pages, 1-5 August 2021.
- [6] Takamasa SATOH, Shuichi SAKAMOTO, Shunsuke UNAI, Takunari ISOBE, Kenta IIZUKA, "Sound-absorption coefficient of a pin-holder structure for sound waves incident in the direction," Noise Control Engineering Journal, Vol.70 No.2, 2022.
- [7] Takamasa Satoh, Shuichi Sakamoto, Isami Nitta, Kota Akamine, Shunsuke Unai, Takunari Isobe, Kenta Iizuka, Experiment and estimation of the sound absorption coefficient of a pin holder structure, Proceedings of INTER-NOISE 2020 (49th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering), Seoul, Korea, Paper No. 982, 10 pages, 23-26 August 2020.
- [8] Takamasa SATOH, Shuichi SAKAMOTO, Kohta AKAMINE, Shunsuke UNAI, Takunari ISOBE and Kenta IIZUKA, "Study and estimation of sound absorption coefficient of pin holder structure," Noise Control Engineering Journal, Vol.69 No.2, pp. 102–111, 2021.

第7章 結論

本章では本研究から得られた結果についてまとめ、最後に今後の課題を述べる。

本研究はフレーム構造の吸音特性を推定する数理モデルを構築する為、段階的に検討を行った。

第2章、第3章では、本研究に共通する内容として吸音率の測定装置、吸音特性の推定に用いた共通の技術について述べた。

第4章ではフレーム構造を構成する基本構造として、円柱が規則的に配置された剣山状構造の数理モデルを対象とした。剣山状構造を音波の入射側から見た場合、音波が進行する空隙部の断面が単純な形状ではない。その為、空隙部の吸音効果を見積る事が難しく、段階的に吸音特性を推定した。推定の為の理論解析の内容としては空隙部を代表的な領域に分割し、それぞれを平行な2平面へ近似した。近似した2平面間のすきま量から領域ごとの伝搬定数と特性インピーダンスを求め、伝達マトリックスを求めた。求めた伝達マトリックスを並列に接続する事で試料全体の伝達マトリックスを求め、理論解析による吸音率を求めた。吸音率について実験結果と解析結果を比較した結果、周波数特性において両者は近い傾向を示し、特に吸音率のピーク値を示す周波数は精度良く推定された。理論解析の結果は全体的に実験結果よりも低い吸音率を示すが、試料間の定性的な関係は実験結果と一致し、構築した数理モデルが有用である事を確認できた。構築した数理モデルを使用した理論解析によって、パラメータスタディを行った。例えば、円柱の長さを変える事で、吸音率のピーク周波数は低周波数域に移ると共に吸音率のピーク値は上がる結果となった。これは一般的な吸音材に見られる傾向であり、この点からも数理モデルは妥当と考える。

第5章では剣山状構造において円柱に対し垂直な方向から音波が入射する場合(横剣山)の数理モデルを対象とした。音波の入射側から見た空隙部の断面積が連続的に変化する事が第4章との違いである。吸音特性を推定するため、試料を代表的な解析ユニットに分け、各解析ユニットを複数層に分割した。分割された層をそれぞれ平行な2平面へ近似し、伝達マトリックスを算出した。分割した層ごとの伝達マトリックスを縦続接続することにより解析ユニットの伝達マトリックスを求め、各解析ユニットの伝達マトリックスをもとに並列・縦続接続を組み合わせる事で試料全体の伝達マトリックスを算出した。試料全体の伝達マトリックスから理論解析による吸音率を求めた。吸音率について実験結果と解析結果を比較した結果、第4章の際と同様、周波数特性において両者は近い傾向を示し、特に吸音率のピーク値を示す周波数は精度よく推定された。理論解析の結果は全体的に実験結果よりも低い吸音率を示すが、試料間の定性的な関係は実験結果と一致した。この事から横剣山構造の吸音特性を推定でき、構築した数理モデルが有用である事が確認できた。当該の数理モデルを用いてパラメータスタディを行い、一例として、剣山状構造における音波入射方向の違いについて吸音率を比較した。その結果、音波が側面から入射する場合(横剣山)の方が

高い吸音率を示した。

第6章では網目・フレーム構造の数理モデルを対象とした。第5章の横剣山の応用で、円柱を構成する面内で円柱同士が垂直に交差する。音波の入射側から見た空隙部の断面が変化する上、空隙部と接触する壁面との関係が複雑になる。吸音特性の推定の為、試料を構成する代表的な領域を解析ユニットとして分け、解析ユニット内を複数層に分割した。分割した層ごとに平行な2平面へ近似し伝達マトリックスを求めた。求めた各層の伝達マトリックスを縦続接続することにより解析ユニットとしての伝達マトリックスを求めた。求めた解析ユニットごとの伝達マトリックスをもとに並列および縦続接続を組合せ試料全体の伝達マトリックスを算出した。フレーム構造は網目構造に対し、円柱層間の空隙層が剣山層になるため、網目構造の数理モデルに剣山層の解析要素を付与した。試料全体の伝達マトリックスから吸音率を推定した。吸音率について実験結果と数理モデルによる理論解析の結果を比較した結果、第5章までと同様、周波数特性において両者は近い傾向を示し、特に吸音率のピーク値を示す周波数は精度よく推定された。理論解析の結果は全体的に実験結果よりも低い吸音率を示すが、試料間の定性的な関係は実験結果と一致した。これらの事から構築した数理モデルが有用である事が確認できた。本研究で扱った剣山状構造、横剣山、網目・フレーム構造の吸音特性を比較した。吸音率は網目・フレーム構造の方が高い結果となり、この結果から複雑な構造の方が高い吸音率を示す事が示唆された。フレーム構造については理論解析の過程で3D-CADを利用している為、実形状を作る前の構想段階で使用する際には不向きである。数理モデルを構想段階で使用するには網目構造の数理モデルにて構想を立て、その結果をもとにフレーム構造の実形状を具現化する方法や、網目構造の数理モデルにおいて空隙層を剣山層に置き換えて利用する方法で代用可能と考える。

本研究では代表的な吸音材であるフォーム材の基本骨格をフレーム構造と見立て、フレーム構造の吸音特性を推定する数理モデルを構築し、その有用性を確認した。結果として4種の構造における数理モデルを構築した。しかし課題は残る。フォーム材には膜が点在する為、膜の効果を数理モデルに反映する事が挙げられる。また、本研究で構築した4種の数理モデルは共通して吸音率が低めに推定される為、より精度を向上させることも課題である。別の視点としては本研究で得られた数理モデルを用いてより良い吸音特性を示す構造を探究する事も考えられる。これらの課題について今後も取り組んでいく。

謝辞

本研究を遂行するにあたり，終始，懇切なご助言，ご指導を頂きました新潟大学 機械音響工学研究室の坂本秀一准教授に深謝いたします。

本論文の執筆に当たり，審査委員である新潟大学 新田勇教授，平元和彦教授，横山誠准教授，大嶋拓也准教授には，多くの有意義なご意見とご助言を頂きました。厚く御礼申し上げます。

機械音響工学研究室にて共に研究を行い，多大なご助言，ご支援を頂きました赤嶺孝太氏，宇内俊介氏，磯部卓功氏，飯塚健太氏，田崎克彦氏，水野千尋氏に心より感謝申し上げます。

研究を遂行するにあたり，多面的なご協力を頂きました機械音響工学研究室の皆様へ感謝いたします。

株式会社フコクの皆様には本研究の遂行にあたり多大なご支援を頂きました。ここに感謝の意を表します。

山田正直氏には本研究の始動にあたり，有益なご助言を頂きました。ここに深謝の意を表します。

なお，本研究は株式会社フコクとの共同研究によるものです。

令和4年2月
佐藤 隆政