

博士論文

木材の吸音特性

～高い周波数域における測定方法の構築と組織構造との関係～

山村 いくみ

目次

序章

1. 研究の背景 1
2. 研究の目的 1

第1章 吸音に関する基礎事項

1. 吸音とは 4
 - 1-1 定義と求め方 4
 - 1-2 測定方法 4
 - 1-2-1 概要 5
 - 1-2-2 定在波比法 5
 - 1-2-3 伝達関数法 7
 - 1-3 吸音機構 9
 - 1-3-1 多孔質型吸音機構 9
 - 1-3-2 板型吸音機構 9
 - 1-3-3 共鳴器型吸音機構 9
- 2 既往の研究 10
 - 2-1 平山嵩による推論法 10
 - 2-2 林弘也らの垂直入射吸音率測定 10
 - 2-3 その他の資料 13

第2章 吸音率の測定～新しい測定方法の構築～

1. JIS 測定器による測定 15
 - 1-1 装置の概要 15
 - 1-2 試料 16
 - 1-3 測定結果 17
2. 高い周波数域での吸音率測定が可能な装置の試作 18
 - 2-1 装置の与条件 18
 - 2-2 装置の仕様 18
 - 2-3 測定方法の詳細 21
 - 2-4 試料 23
 - 2-5 測定結果と考察 26

第3章 吸音特性と木材組織構造の関係

- 1 共鳴周波数の算定 31
 - 1-1 板型吸音機構による算定 31
 - 1-2 共鳴器型吸音機構による算定 32
 - 1-2-1 気柱の共鳴 32
 - 1-2-2 共鳴器型吸音機構の応用 33
 - 1-2-3 算定方法についての考察 33
 - 1-3 資料の計測 35
 - 1-4 算定結果 37
 - 1-4-1 スギ 37
 - 1-4-2 ヒノキ 37
 - 1-4-3 キリ 37
 - 1-4-4 ミズナラ 38
 - 1-4-5 バルサ 38
- 2 吸音率の算定 44
 - 2-1 算定式 44
 - 2-2 算定結果 46
 - 2-2-1 スギ 46
 - 2-2-2 ヒノキ 46
 - 2-2-3 キリ 46
 - 2-2-4 ミズナラ 46
 - 2-2-5 バルサ 46
 - 2-3 まとめ 47

第4章 木材の吸音特性の応用への提案

- 1. 応用への提案 49

参考文献 51

謝辞 53

序章

1. 研究の背景
2. 研究の目的

1. 研究の背景

近年木材の利用促進のために、工法上あるいは政策上さまざまな試みがなされているが、より一層の利用促進を図るには、これまであまり顧みられなかった特性について明らかにし、そこから新たな利用法について考察することが必要ではないかと考えられ、そのひとつとして木材の吸音性能に着目した。木材の木口断面に見られる多孔質な構造が、建築材料の孔あきボードのように吸音性能があるのではないかと思われたからである。そして、その微細な組織構造は、より高い周波数を吸音するのではないかと推測した。

木材は古くから楽器や内装材に用いられてきたが、音響材としては共振特性ならびに反響特性を利用したものである。中には孔あきボードや凹凸を施した内装材が吸音材として扱われることがあるが、これらは形状による吸音効果や複合材として吸音を応用したもので、木材自体の吸音性能によるものではない。実際、孔あきボード、合板、ファイバーボード、グラスウールとの複合材料などの木質材料の吸音率データは多数あるものの、意外にも木材単体の吸音率を樹種別に測定したものは少ない。

そこで、まずは樹種別に吸音率を測定してみようと考えた。もしかしたら、その吸音率のデータは先駆的な試料となるかもしれない、また、興味深い特性も見いだせるかもしれないという期待もあった。本研究はこのような背景のもとに始められた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、第1に木材の吸音率を測定すること、第2に、その吸音性能が木材のどのような特性に起因するのか明らかにすること、第3にその性能を活かす方策を提案することの3つである。

第1目的の吸音率測定では、木材の樹種や断面方向の違いによる吸音特性が明らかになるような測定方法を検討することとした。試料の選定にあたっては、将来の実用化を見据えて入手しやすい樹種とし、特別な加工もなるべく避けることをこころがけた。

第2の吸音性能をもたらす木材の特性の検討では、特に木材の組織構造との関係に主眼をおいて解析した。その際、なるべく平易な関係式あるいはモデル化によって提示を行うこととした。

こうして見いだされた木材の新たな特性を活かす方法を考え、今後の木材の普及促進に一役を担うような提案をすることが、本研究の最終目的である。

第 1 章 吸音に関する基礎事項

1. 吸音とは

1-1 定義と求め方

1-2 測定方法

1-2-1 概要

1-2-2 定在波比法

1-2-3 伝達関数法

1-3 吸音機構

1-3-1 多孔質型吸音機構

1-3-2 板型吸音機構

1-3-3 共鳴器型吸音機構

2 既往の研究

2-1 平山嵩による推論法

2-2 林弘也らの垂直入射吸音率測定

2-3 その他の資料

1. 吸音とは

1-1 定義と求め方

音は空気や液体、固体等の媒質を構成する粒子の振動が圧力の変化として伝搬する現象である。このような現象を波といい、エネルギーをもっている。

図1のように、音が媒質Ⅰの中を媒質Ⅱに向かって進むとき、はじめの入射音 I は媒質Ⅱの表面で反射する音 I_ρ と、媒質Ⅱ内に吸収される音 I_α と、媒質Ⅱの反対側へ透過する音 I_τ に分解される。エネルギーとしては、次式のように表わされる。

$$I = I_\rho + I_\alpha + I_\tau \quad \dots(1)$$

このとき、入射音にたいする反射しなかった音の割合を吸音率 α と定義されている。

$$\alpha = (I - I_\rho) / I \quad \dots(2)$$

つまり、吸音率は媒質Ⅱ内に吸収された音と、媒質Ⅱの反対側へ通り抜けた音の和となる。極論すると、媒質Ⅱに入射した全ての音が吸収されず透過しても、吸音率という。とくに、媒質Ⅱの背後に空気層がある場合は、媒質Ⅱ自体の吸音率ではなく、後に述べる板型吸音機構や共鳴器型吸音機構を伴い、正確な吸音率を得ることができないので注意を要する。このような紛らわしさを避けるために、入射音 I に対する吸収される音 I_α のみの割合を吸収率 a として、吸音率 α と厳格にわけている文献¹⁾もある。

$$\text{吸収率 } a = I_\alpha / I \quad \dots(3)$$

なお、吸音率は周波数ごとに0~1の値で表わされる。一般に0.35⁵⁾以上のものを吸音性能がある材料と評価する。

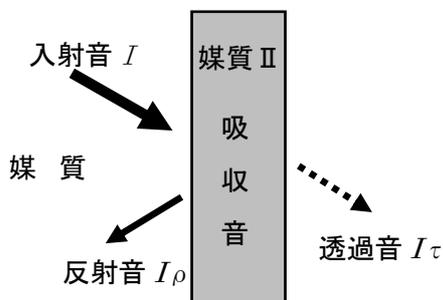


図1 音エネルギーの分解

1-2 測定方法

1-2-1 概要

吸音率の測定には残響室法と垂直入射吸音率測定法があるが、単体の試料の場合は後者を用いる。残響室法は実用に近い状態における材料の吸音率を求めるときに用いられ、合板や孔あき板、異種の材料が積層された複雑な構造の試料、ときには家具や部品などの吸音率を測ることができる。垂直入射吸音率法にはさらに、従来から実施されている定在波比法と近年主流となってきた伝達関数法がある。

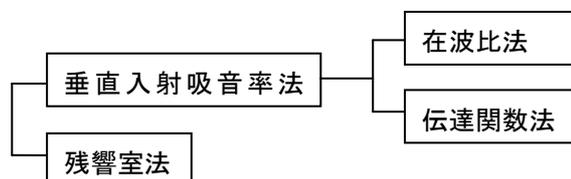


図2 吸音率の測定方法

1-2-2 定在波比法

定在波比法による吸音率の測定概要は次のとおりである。

測定装置は図4に示すように音響管、試験体ホルダー、スピーカー、マイクロホン、音発生装置、録音および音圧解析装置からなる。音響管内で音を発生させると、試料に向かう入射波と、試料面からの反射が干渉しあい図4のように定在波を生じる。このとき、隣接する音圧の最大値と最小値を測定し、下記の式により算出する。

定在波の最大値 P_{max} と隣接する最小値 P_{min} の差を n とすると、吸音率 α は

$$n = |P_{max} - P_{min}| \quad \dots (4)$$

$$\alpha = 1 - \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad \dots (5)$$

と求められる。

音源にはホワイトノイズが用いられ、測定周波数はおよそ 100~6000Hz までの 1/3 オクターブバンドの中心周波数 (100、125、160、200、250、315、400、500、630、1000、1250、1600、2000、2500、3150、4000、5000Hz) で表される。

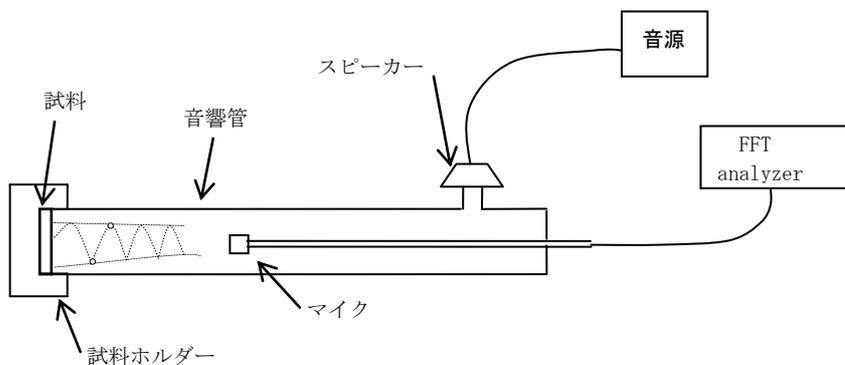


図 3 垂直入射吸音率測定装置

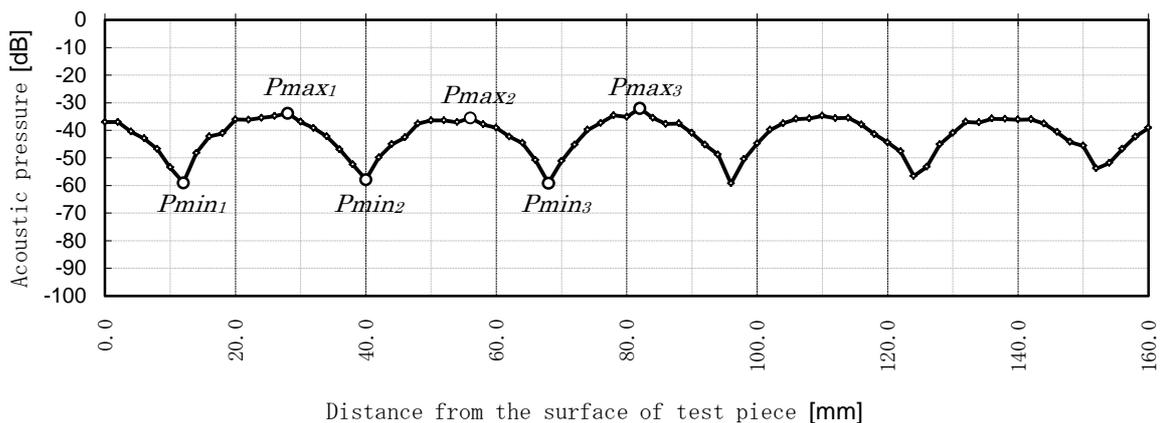


図 4 音響管の中の定在波

1-2-3 伝達関数法

伝達関数法は2マイクロホン法ともいわれ、音響管に固定された2本のマイクロホン間の伝達関数、すなわち音圧の比を測定することにより吸音率を算出するものである。そして、測定音圧を複素数を用いて表すことが特徴である。

図5において、入射波 p_i 、反射波 p_r 、2本のマイクロホンの音圧 p_1 、 p_2 を測定し、それぞれ下記の式のように表わす。

$$p_i = q_i e^{jkx} \quad \dots (7)$$

$$p_r = q_r e^{-jkx} \quad \dots (8)$$

$$p_1 = q_i e^{jkx_1} + q_r e^{-jkx_1} \quad \dots (9)$$

$$p_2 = q_i e^{jkx_2} + q_r e^{-jkx_2} \quad \dots (10)$$

q_i 、 q_r は基準面 ($x=0$) における p_i 、 p_r の振幅、 k は波長定数で式 (11) によって求められる。 x_1 、 x_2 はマイクロホンの基準面からの距離である。

$$k = \omega / c = 2\pi f / c \quad \dots (11)$$

ω : 角周波数 [rad/s]

f : 周波数 [Hz]

c : 音速 [m/s]

入射波、反射波に対する伝達関数 H_i 、 H_r は、

$$H_i = p_{2i} / p_{1i} = e^{-jk(x_1 - x_2)} \quad \dots (12)$$

$$H_r = p_{2r} / p_{1r} = e^{jk(x_1 - x_2)} \quad \dots (13)$$

ここで、式(3)と同様に基準面の反射率を ρ とする (ただし、厳密には、 ρ は反射波の圧力振幅の複素数比と定義づける) と、 $p_r = \rho p_i$ であるから、入・反射波からなる伝達関数 H_{12} は、

$$H_{12} = p_1 / p_2 = (e^{jkx_1} + \rho e^{-jkx_1}) / (e^{jkx_2} + \rho e^{-jkx_2}) \quad \dots (14)$$

$$\therefore \rho = (H_{12} - H_i) / (H_r - H_{12}) \cdot e^{2jkx_1} \quad \dots (15)$$

となり、反射率 ρ は測定された伝達関数、距離 x_1 及び波長定数 k から求めることができる。

式(2)より、吸音率 $\alpha = 1 - I_\rho / I$ であり、式(15)で得られた反射率 ρ は複素数であるので、(16)によって、吸音率 α は求められる。⁶⁾

$$\alpha = 1 - |\rho|^2 \quad \dots (16)$$

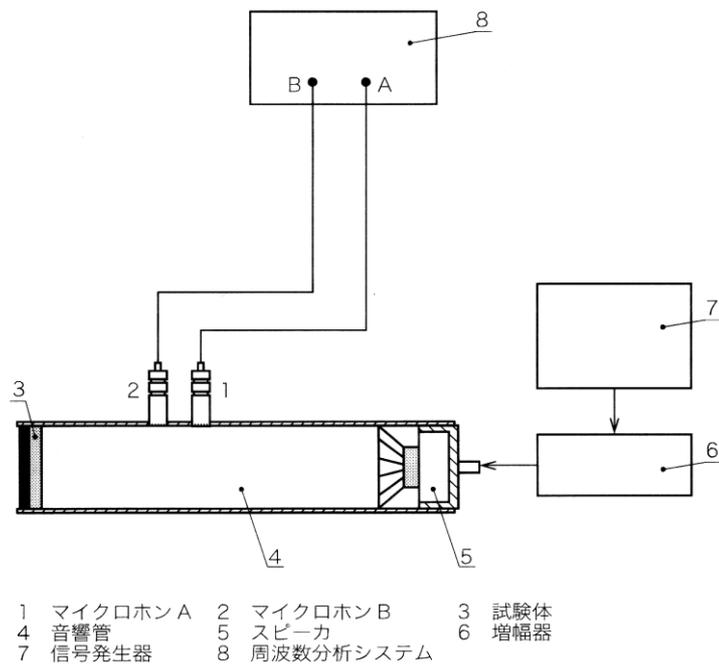


図 5 伝達関数法の装置⁶⁾

1-3 吸音機構

固体が音を吸音する仕組みには、大きく多孔質型吸音機構・板振動型吸音機構・共鳴器型吸音機構の3つの型に分類される。吸音とは、入射された音のエネルギーが、これらの吸音機構により他のエネルギーに変換され、もとの入射エネルギーが減少することをいう。

1-3-1 多孔質型吸音機構

多孔質とは、綿やグラスウールなどの繊維が、接着されないで、ただ絡み合っている状態の材料をいい、孔が多く開いた材料ではない。このような材料に音が入射されると、繊維の周りの空気が音のエネルギーを受けて振動し、繊維表面と摩擦をおこし、摩擦熱エネルギーに変換される。

1-3-2 板振動型吸音機構

背後に空気層を設けた板状の材料に音を入射させると、板が質量、背後空気層と板の弾性がバネとなる共振現象が現れる。このとき、入射音のエネルギーが板の振動エネルギーに変換されることによって吸音される。

1-3-3 共鳴器型吸音機構

図6のC.の壺型モデルにおいて、壺内部に向かって音が入射すると、壺の首の部分の空気が質量、空洞部の空気がバネとなる共振系を構成する。このとき、壺固有の周波数が入射されると、首部分の空気が共鳴して激しく振動し、摩擦熱エネルギーに変換される。孔あき板は、壺の空洞部が連結したものとみなされる。

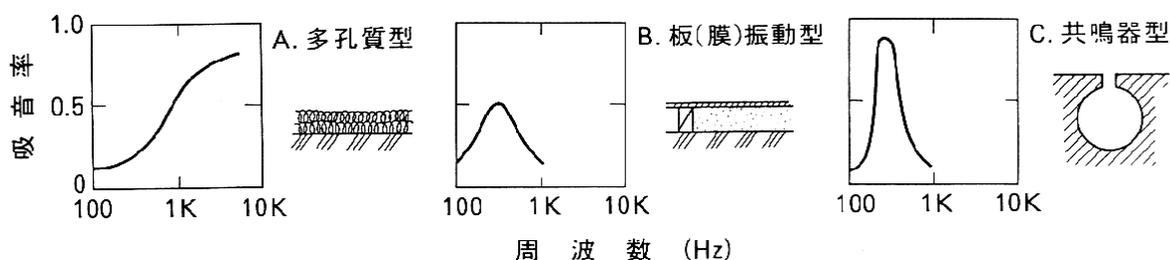


図6 吸音機構³⁾

2. 既往の研究

木材単体の吸音率についての研究論文は非常に数が少ないが、1930年に発表された平山嵩の『木材の吸音係数に就て』⁷⁾と1967年の渡辺治人・林弘也らの『木質材料の音響学的研究(第1報)木材の垂直入射吸音率について』⁸⁾の2編を以下に簡単に紹介する。

2-1 平山嵩による推論法

平山の研究は、木材横断面の吸音率を算定する方法とその結果を述べたもので、とりわけ算定方法について詳述されている。要約すると、木材横断面の微細な孔を毛細管とみなし、その管の内壁と空気との摩擦エネルギーを、空気の粘性と速度から求めて、理論値としての吸音率とみなしている。具体的には、横断面の顕微鏡写真を撮影して開口率を求め、その数値を用いて吸音率を算出している。松、杉、桂、栃など19種類の樹種を試料に、128Hz～4028Hzの6つの周波数についての結果を提示しており、結果は図7のように周波数と吸音率が正の二次曲線の関係を示すこととなる。実際に音を発生させて吸音率を測定したものではないが、理論値として大いに参考となる。

2-2 林弘也らの垂直入射吸音率測定

数少ない測定の事例として、1967年に発表された渡部治人、林弘也らによる論文が挙げられる。この研究は日本工業規格(JIS)に準拠した測定機を使用したものである。図8に林らの行った吸音率測定のうち、スギ(厚さ9mm)、キリ(厚さ3mm)、ヤナギ(厚さ7mm)の木口断面の結果を示す。このグラフから、スギは吸音率が0.01から0.15の範囲で推移し、630Hzと3150Hzに若干ピークがみられる。キリは吸音率がほぼ0.05で一定で、スギもキリも吸音率はほとんどないと評価される。一方、ヤナギは前者とは異なり吸音率が0.3から0.6で推移し、2000Hzと4000Hzで最大値のピークを、3150Hzで最小値を示す特徴的なグラフを呈している。しかし、林らの測定は図9のように試料の背後に約50mmの空気層をとったものである。背後に厚い空気層を擁する薄い板状あるいは膜状の物体の吸音率は、物体の物性よりも空気層との関係に大きく左右される。さらに、試料の厚さが同一でないため、この結果からは単純に吸音率の比較はできない。

1995年に出版されたVoichita Bucur 著の『Acoustics of Wood』¹¹⁾に林らのこの研究論文が紹介されており、2006年の同書の第2版¹²⁾においても引き続き掲載されていることから、世界的に見ても、木材単体の吸音率測定はあまり例を見ない研究であることが推測される。

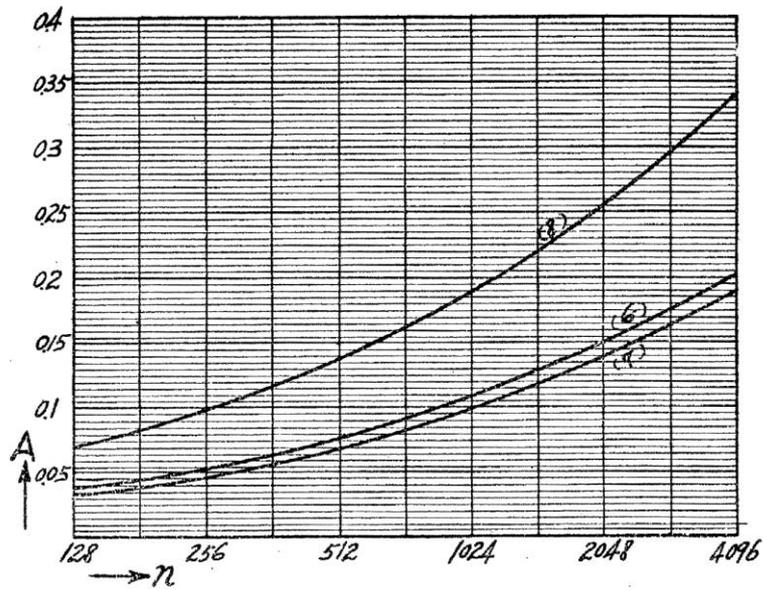


図7 杉の吸音率測定結果 (平山による)

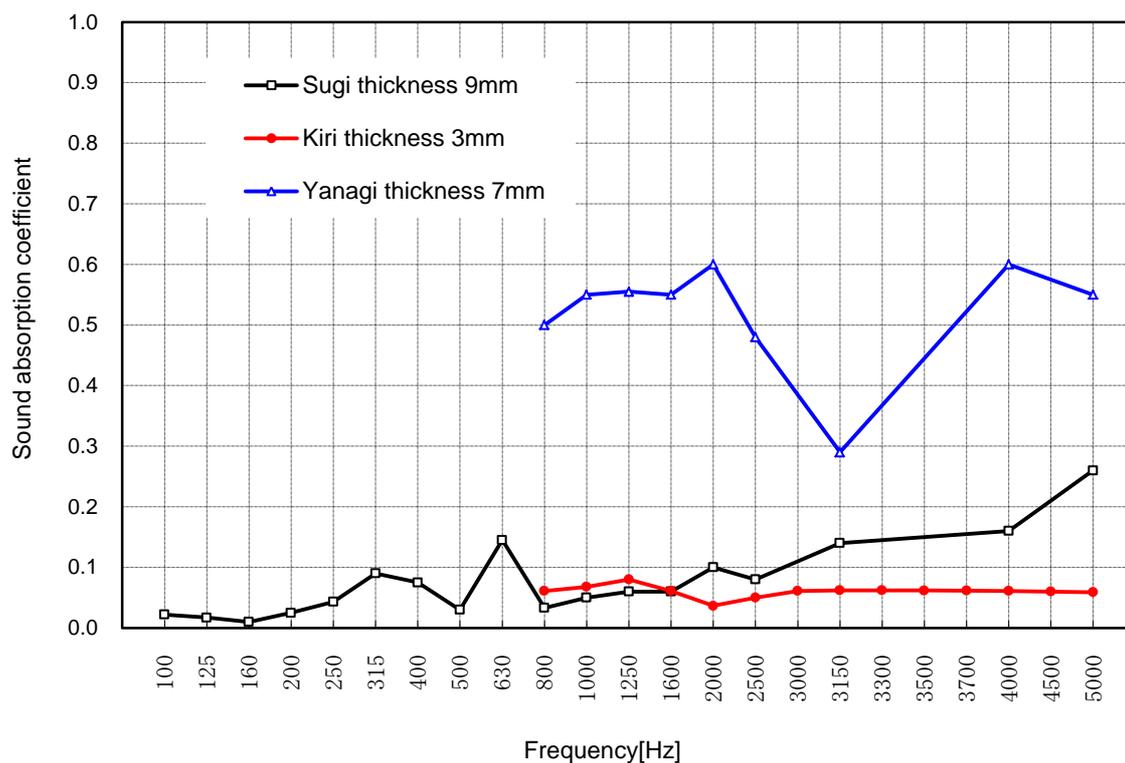
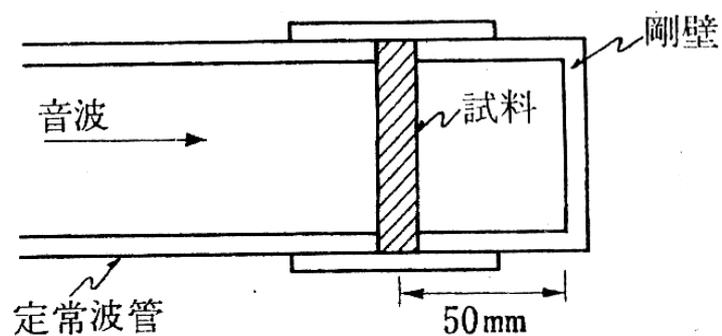


図8 林らの測定結果



試料の取付状態

図9 渡辺・林らの試料の取り付け方法

2-3 その他の資料

合板、木毛セメント板、パーティクルボード、畳など「木質材料」に範囲を拡大し、残響室吸るば、日本建築学会編集の『建築の音環境設計』の巻末には付録として、多孔質材料のグラスウール・ロックウールなどの厚さ・密度・空気層厚の異なるもの 20 種類、板状材料の石膏ボードや合板などの厚さ・空気層厚を変えたもの 12 種類、孔あき板では、孔の径やピッチ・板厚・裏打材の有無、空気層厚など、55 種類もの異なる条件の吸音率を、その他ガラスやコンクリートなどの一般建材も含めて、合計 191 種類の材料の残響室法による測定結果が掲載されている。また、日本音響材料協会編集の『吸音材料』¹³⁾には、ロックウール・グラスウールなどの多孔質材料、塩ビフォーム・ポリエチレンフォームなどの柔軟材料、ビニルシート、帆布カンバスなどの膜状材料、合板・石膏ボードなどの板状材料、孔あき石膏ボード・孔あき合板などの孔あき板材料について、厚さ・密度・背後層などの条件を細かく変えながら、それぞれの材料の吸音率測定結果とその特性について詳述されている。

しかし、木材単体で、樹種別、断面方向別に明記測定されたデータはほとんど見ることはできない。わずかに『木材の物理』¹⁴⁾においてトウヒ板材、マツ板材の数値が掲載されている程度であるが、板厚、背後空気層等の条件については不明である。

第2章 吸音率の測定～新しい測定方法の構築～

1. JIS 測定器による測定
 - 1-1 試料
 - 1-2 測定結果
 - 1-3 考察
2. 試作機の製作
 - 2-1 装置製作の目的
 - 2-2 装置の概要
 - 2-3 音源
3. 測定方法の構築
 - 3-1 データ処理の詳細
 - 3-2 オクターブ法との違い
4. 試料
 - 4-1 基準試料
 - 4-2 木材
5. 測定結果
6. 考察

1 JIS 測定器による測定

1-1 装置の概要

本研究における最初の測定として、林らと同様の測定を試料の背後に空気層のない状態で行い、比較することが必要と考え、JIS 規格の垂直入射音響管による測定を試みた。装置は東京都立産業技術研究センター所有のもので、2008年6月26日から28日の3日間借り切って測定を行った。



図 10 JIS 規格の垂直入射音響管測定装置（於：東京都立産業技術研究センター）

左：B管 右：A管

1-2 試料

試料にはスギ、キリ、ミズナラの木口断面を用い、厚さはいずれも 10mm とした。厚さを 10mm に統一した理由は、細胞内腔が貫通して背後に空気による音の伝達がないようにする必要があったこと、また、薄い試料は歪んだりひび割れたりする可能性もあるからである。樹種に関しては、渡辺らが用いたヤナギ木口断面は目視ではあまり細胞孔が目立たず、年輪界も明瞭ではないので、むしろ道管径の大きい樹種の方が吸音率は大きいのではないかと考え、本実験ではヤナギをミズナラに換えて測定した。



図 11 試料 左からスギ、ミズナラ、キリ それぞれ木口面

1-3 測定結果

図 12 に背後空気層を持たない状態でのスギ、キリ、ミズナラの結果を示す。なお、図 12 において、スギとミズナラのグラフの線が 2 本表示されているのは、JIS 測定機の音響管は、測定周波数が 100~2000Hz 用の A 管と 800~5000Hz 用の B 管の 2 本用いて測定するためである。低周波数用の A 管は測定時間が長く、吸音率が小さく変化に乏しい場合は測定を省略することがあり、キリの測定では B 管のみの測定とした。

期待に反して、ミズナラの吸音率は低く 0.05~0.1 程度であった。スギは 0.01~0.15 へ周波数とともに吸音率も増加し、キリは 0.06~0.13 を推移し、林らの測定値よりも大きな値となった。しかし部分的には、林らの測定のヤナギで見られる 3150Hz を底とする V 型の特徴的なスペクトラムが、この測定でもスギとミズナラにおいて見られた。筆者はこの 3150Hz 近傍の吸音率についてもう少し詳細に測定したいと考えた。さらに、スギの吸音率が周波数が高くなるにつれ漸次増加していることから、5000Hz 以上の周波数域でのスペクトラムにも興味を持たれた。

そこで、5000Hz 以上の吸音率が測定できる装置を試作することとした。

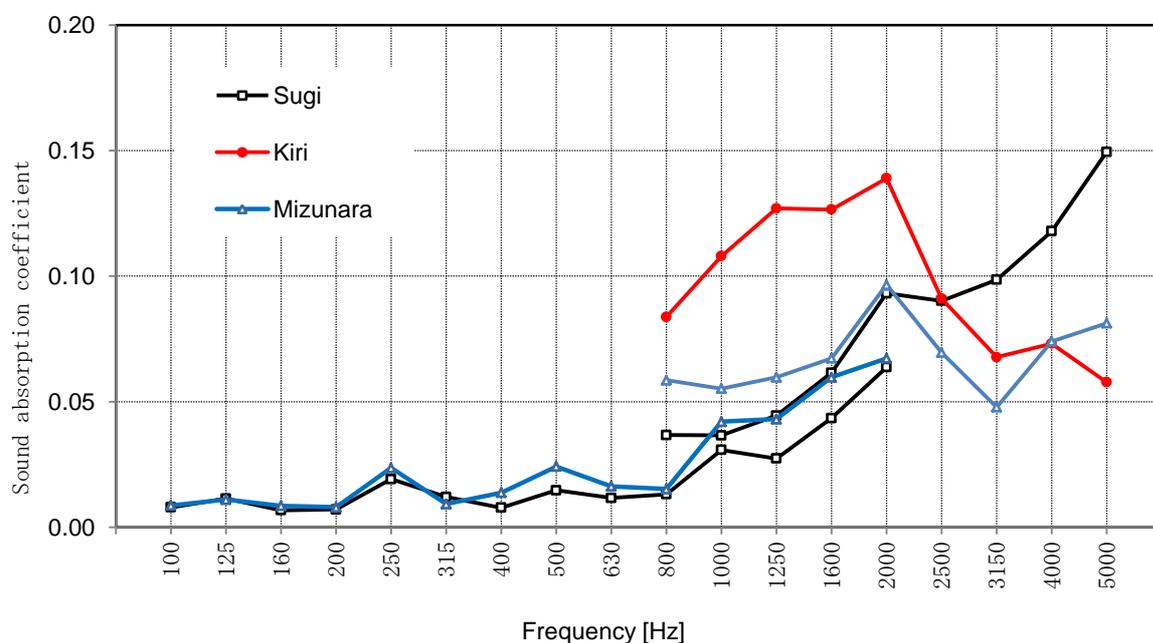


図 12 JIS の装置による吸音率測定結果.

2 高い周波数域での吸音率測定が可能な装置の試作

2-1 装置の与条件

一般的に、吸音率の測定は建築音響や騒音制御を対象としているため、その測定可能範囲はおおよそ 100Hz~6400Hz とされている。木材の微細構造を対象とした場合は、これよりも高い周波数域での吸音特性を見ることも重要と考え、まずはその測定のための装置を製作することとした。

試作する装置は JIS の定在波比法に準拠するものとした。JIS では音響管の内径や長さ、マイクロフォンの直径は、測定される周波数に応じた規定があり、その概略と、前述の測定に使用した JIS 機及び製作機の仕様を表 1 にまとめた。

測定周波数の下限値 f_l は、スピーカーと試料前面までの距離 l と管の内径 d から、 $l \geq 250/f + 3d$ と規定されており、この式を変形すると下記式 (17) が導かれる。

$$f_l \geq \frac{250}{l - 3d} \quad \dots(17)$$

また、管の試験部分の長さ L はこの下限周波数において、 $L \geq 3\lambda/4$ の規定があり、波長 λ 、周波数 f 、音速 c の関係式 $\lambda = c/f$ から式 (18) が導かれる。

$$L \geq \frac{3c}{4f} \quad \dots(18)$$

2-2 装置の仕様

試作器は図 13 のように肉厚 5mm のステンレス管の垂直入射音響管とした。

式 (17) に、 l および d の実測値をそれぞれ代入すると、下限値は $f_l = 877\text{Hz}$ と求められた。式 (18) で音速 $c = 340\text{m/s}$ としして管の試験部分の必要長さを求めると $L = 0.32\text{m}$ となり、実長 0.35 m は式 (4) を満たしていることが確認された。上限周波数 f_u は音響管の内径によって規定され、 $f_u < 0.58c/d$ となり、 $f_u = 13146\text{Hz}$ と算出された。したがって、この試作器の測定可能周波数は理論的には 877Hz~13146Hz と求められた。

音響管断面に対するマイク面積占有率は、16.0% となり JIS の規定よりかなり大きい。しかし、直径 6mm より小さいコンデンサーマイクが入手できなかったこと、また、本研究はあらゆる試料を包括的に比較可能な吸音率の一覧表を作成することではなく、木材の特性を見いだすことが目的であるので、マイク占有率が JIS 規定を超えていることを許容することとした。

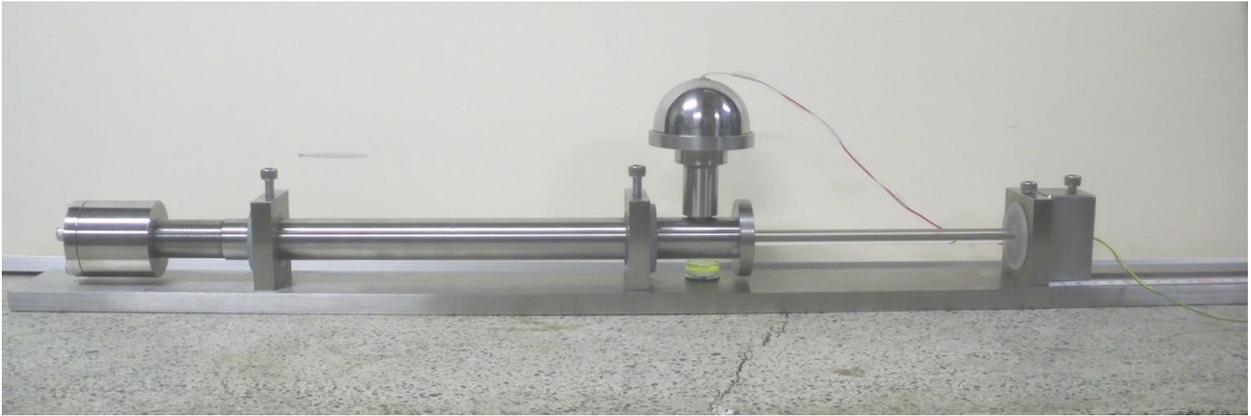


図 13 製作した装置



図 14 試料ホルダー

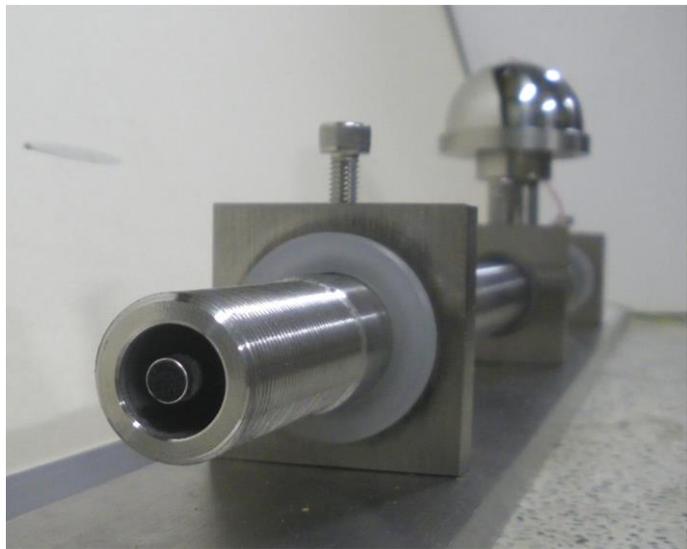
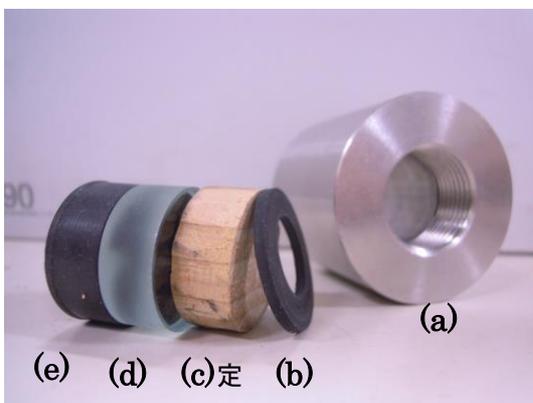


図 15 音響管内部。管中央に見えるのはマイク



- (a) 試料ホルダー。
- (b) 緩衝材のエチレンプロピレンゴムのリング。
厚さ 2mm。内径 15mm。
- (c) 試料 (スギ木口)
- (d) 剛壁のガラス
- (e) 背後緩衝材のエチレンプロピレンゴム

図 16 試料の取り付け方

Table 1. Specification and schema for the equipment.

	JIS condition	JIS A tube	JIS B tube	Produced equipment
Distance between speaker and surface of test piece l [m]	$l \geq \frac{250}{f_l} + 3d$	—	—	0.33
Tube length l_t [m]	$l_t \geq \frac{3\lambda}{4}$	—	—	0.35
Relations of upper limit frequency f_u and the sound tube diameter d	$f_u \cdot d < 0.58c$	—	—	—
Internal diameter of tube d [m]	—	—	—	15×10^{-3}
Diameter of microphone [m]	—	—	—	6.0×10^{-3}
Measurable frequency f [Hz]	—	$100 \leq f < 2000$	$800 \leq f < 5000$	$877 \leq f < 13146$
Microphone area share for the sound pipe section [%]	≤ 5	1.2	6.3	16.0

c : Velocity of sound is 340[m/s].

λ : Wavelength [m].

2-3 測定方法の詳細

JIS機では自動的にマイクロフォンが移動して定在波の音圧を測定し吸音率を算出していくが、試作機ではマイクロフォンを手動で2mm ずつ移動させ、その位置における音圧を読み取った。読み取りには音声解析ソフト FFT Analyzer (Ver. 4.0、E.N. Software 社) を用いた。マイクロフォンが収録した音は約 10.8Hz ごとに分解され、周波数ごとに音圧[dB]として数値化される。FFT Analyzer は5秒ごとにピークホールドを表示するように設定し、収録開始から8秒目のピークホールド値[dB]をその位置における音圧として解析を行った。ピーク値を用いたのは、暗騒音の影響を排除するためである。音源にはホワイトノイズ正弦波 (WaveGene Ver 1.40、efu 社) を用いた。

試料表面の位置を $x=0$ として、マイクロフォンの位置を横軸に、音圧を縦軸にプロットすると Fig. 1 のような定在波のグラフが得られる。定在波のグラフから $0 < x$ で音圧の最小値を順に $P_{\min 1}$ 、 $P_{\min 2}$ 、 $P_{\min 3}$ …、同様に最大値を $P_{\max 1}$ 、 $P_{\max 2}$ 、 $P_{\max 3}$ …として抽出し、 $n_1 = |P_{\min 1} - P_{\max 1}|$ から式 (2) を用いて吸音率 α_1 を算出する。同様に $n_2 = |P_{\max 1} - P_{\min 2}|$ から α_2 、 $n_3 = |P_{\min 2} - P_{\max 2}|$ から α_3 を求める。こうして得られた α_1 、 α_2 、 α_3 の平均値をその試料の任意の周波数の吸音率の実測値 α とする。

次に、横軸に周波数を、縦軸に吸音率をとりグラフ化すると Fig. 7 のような吸音率が得られた。これはガラスの吸音率の測定結果であるが、吸音性能がないはずの材料であるにも関わらず、Fig. 4 に示す木材の吸音率より大きな値を示していたり、7000Hz で吸音率が 0.7 以上になるなど不自然な値を示した。これらは試料の実際の吸音ではなく、装置の共振によるものではないかと考えた。また、値が細かく上下して特徴が抽出しにくいので、このグラフを1回微分した (Fig. 8 の点線のグラフ)。するとこの1回微分のグラフは、一定の間隔で極小値をもって推移しているという規則性が顕著となった。そこで、この極小値を拾ってつないでいくと、実線のような右上がりの読みやすいグラフが得られた。この実線のグラフを本研究では試料の吸音率とみなすこととした。

仮に、JIS と同様に 1/3 オクターブバンドの周波数で吸音率の生データをプロットすると Fig. 8 の丸付線のようになり、共振とみなした部分の吸音率を拾っている場合がある。そこで今回提案したような波型に繰り返されるグラフの極小値を拾ってグラフ化する手法を用いることで、その試料固有の吸音特性を表すことが可能となった。

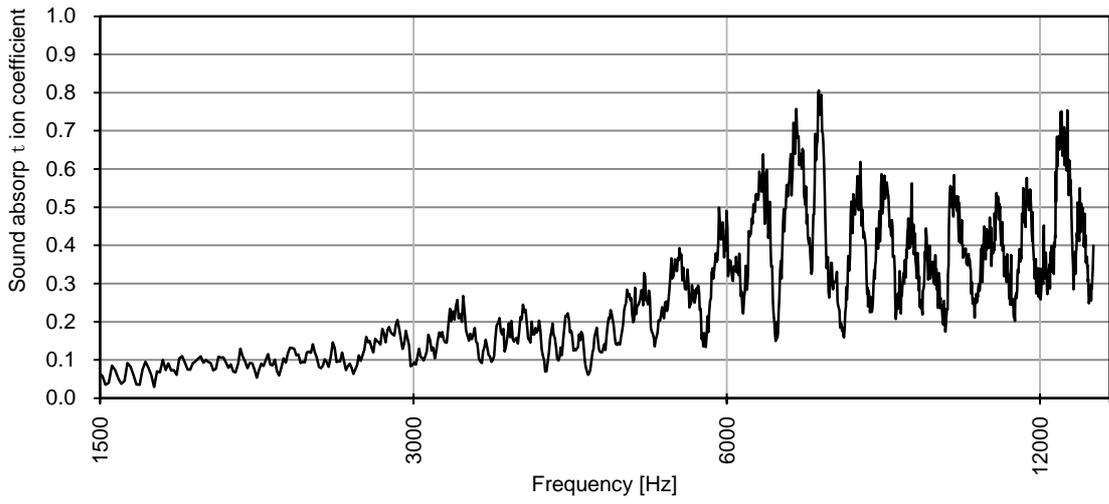


Fig.17 Raw data of sound absorption coefficient of a glass.

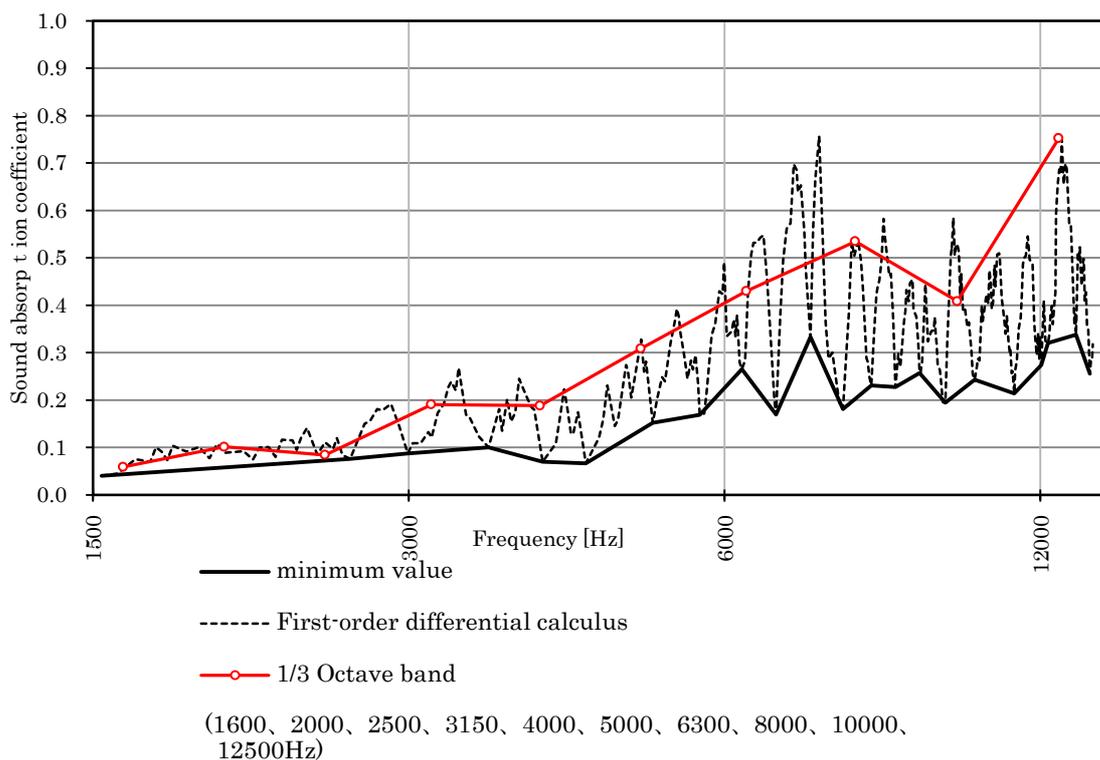


Fig21 Processing data of the sound absorption coefficient of glass.

2-4 試料

試料はスギ (*Cryptomeria japonica D. Don*)、ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa Endl*)、ミズナラ (*Quercus mongolica var. grosseserrata*)、キリ (*Paulownia tomentosa*)、バルサ (*Ochroma lagopus*) の 5 種の木材を用いた。それぞれ同じ材から木口断面と柾目面を 3 個ずつ採取した。特に木口断面はバリの影響や組織細胞のつぶれが生じないように、表面をマイクロトームで平滑に切削した。木材の他、吸音性能のない基準物質としてガラスを用いた。大きさはいずれも直径 25mm、厚さ 10mm である。試料は、背後に剛壁としてガラスを空気層を持たないように、かつ、装置の振動が直接試料に伝わらないようにエチレンプロピレンゴムを介して試料ホルダーに取り付けた。Fig. 6 に試料の取り付け方を示す。

表 2 試料の密度

	Sugi	Hinoki	Kiri	Mizunara	Balsa	Glass
Cross section	0.331	0.498	0.224	0.557	0.160	
Radial section	0.357	0.498	0.302	0.654	0.145	2.478

[g/cm³]

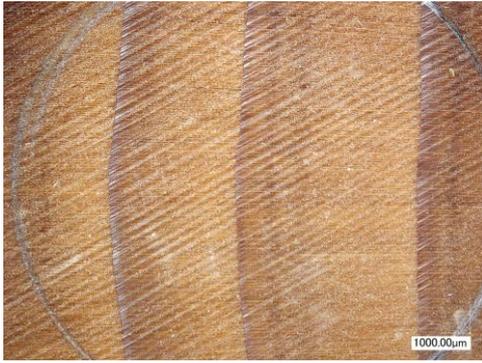


図 19 スギ 木口



図 20 ヒノキ 木口



図 21 キリ木口



図 22 ミズナラ木口



図 23 バルサ木口



図 24 POM 孔Φ1mm



図 25 POM 孔Φ0.5mm

2-5 結果と考察

試作器による吸音率の測定結果を Fig. 26~31 に示す。なお、全試料において周波数 7200Hz のあたりで吸音率ピークが見られ、とりわけガラスで最大値が 0.4 を超すような不自然な結果となった。これは、前出の 4.2. の項で述べた処理で除去しきれなかったノイズや、装置固有の振動等によるものと考えられる。よって、このピークを成す 6700Hz~7700Hz (図中網かけ部分) は検討対象から外すこととした。

測定の結果、全樹種で、ほぼ全周波数において柾目面よりも木口面の方が吸音率は高いことがわかった。柾目の吸音率が高くなるのはキリとバルサで部分的にみられたが、その値もわずかであった。

針葉樹のスギ、ヒノキは、高周波数域 (本研究ではこれ以降 7700Hz 以上とする) ほど柾目面と木口面の差が大きくなるが、広葉樹のキリ、ミズナラ、バルサは断面方向による差は小さい。とりわけキリは、木口面も柾目面も吸音率がほぼ同じ値で推移した。

吸音率の値は、木口断面では低周波数域 (本研究では 6700Hz 以下とする) において、バルサが他の 4 樹種よりも若干高めだが、高周波数域ではスギ、ヒノキの方が大きくなり、10000Hz 以上では 0.4 から 0.6 の間を推移する。広葉樹はミズナラとバルサが 12000Hz 以上で吸音率 0.4 をわずかに超す程度であった。

低周波数域では、ガラスの吸音率とスギ柾目、ヒノキ柾目、キリのスペクトラムに類似性がみられた。このことから、針葉樹の柾目並びにキリは、ほとんど吸音性能がないものと言える。

試作器による測定結果からは、林らの測定 (図. 8) および著者らの行った JIS 試験機による測定 (図. 12) に見られるような、広葉樹木口断面の 3150Hz における急激な吸音率の低下は見られなかった。しかし、全樹種において、柾目断面の 4400Hz 近傍での吸音率の低下がみられた。バルサでは 4000Hz にも現れた。

一般的に多孔質材料は、密度の高いものは低周波数帯の吸音性能が優れ、低いものは高周波数の優れると言われる⁵⁾ が、本測定結果からは吸音率と密度 (表 2.) の相関性はみられなかった。むしろ、木材の吸音率は密度ではなく組織構造と密接な関係があるものと推測される。

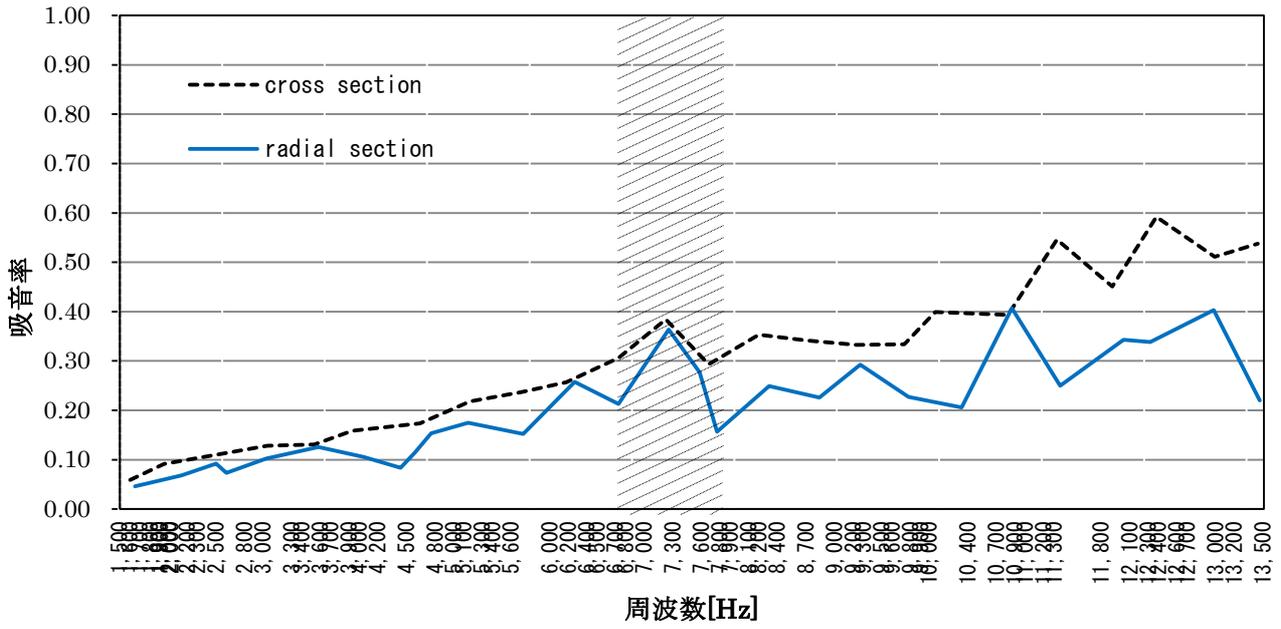


図.26 スギの吸音率

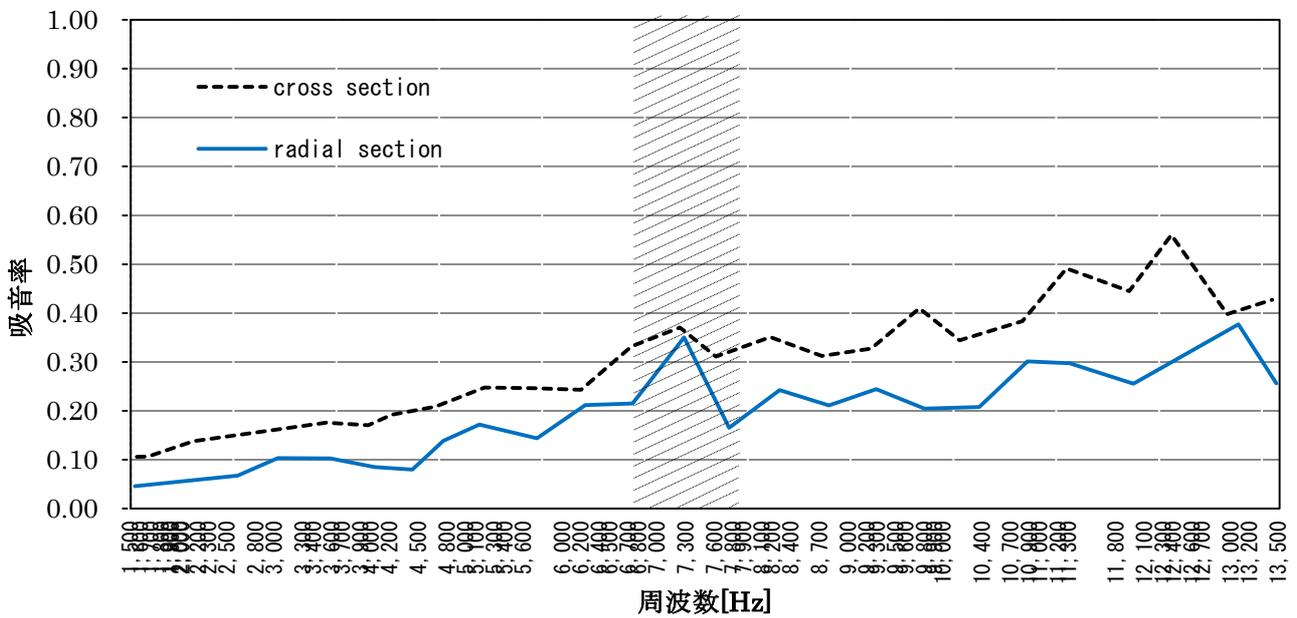


図.27 ヒノキの吸音率

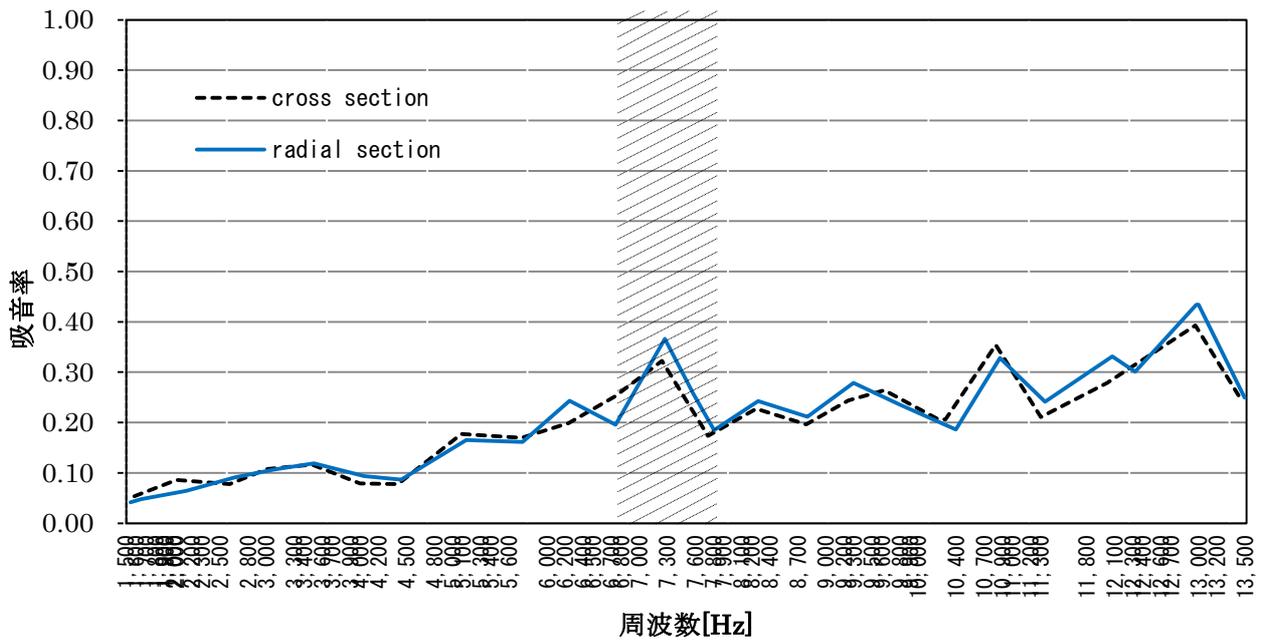


図 28 キリの吸音率

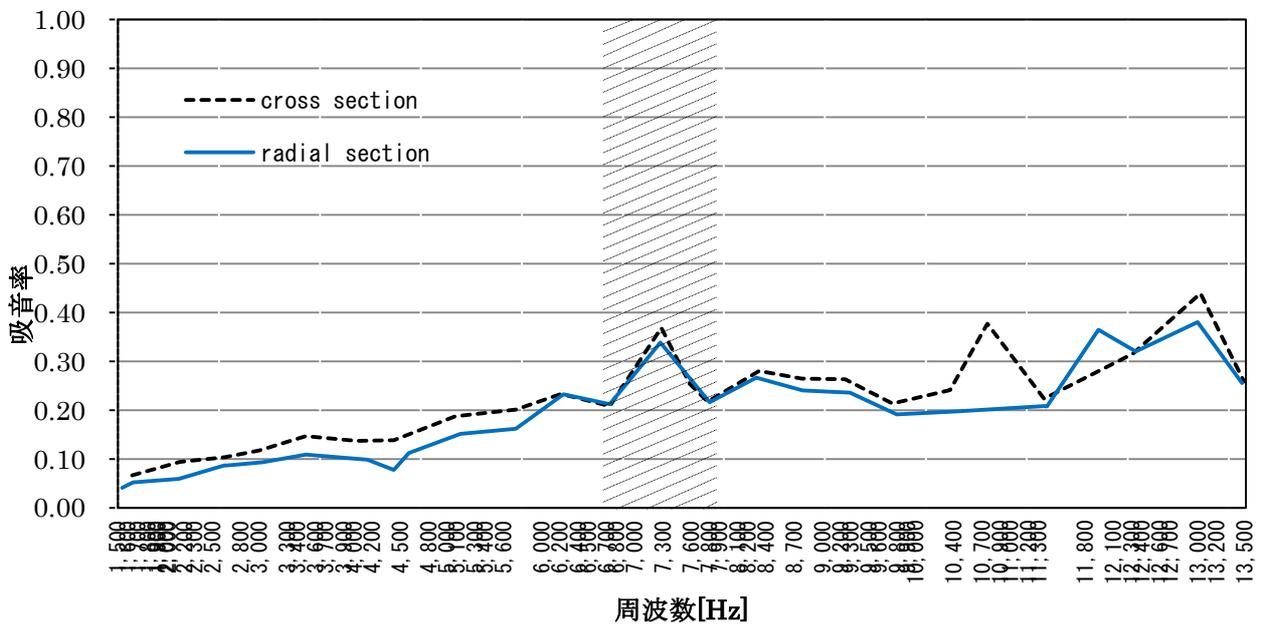


図 29 ミズナラの吸音率

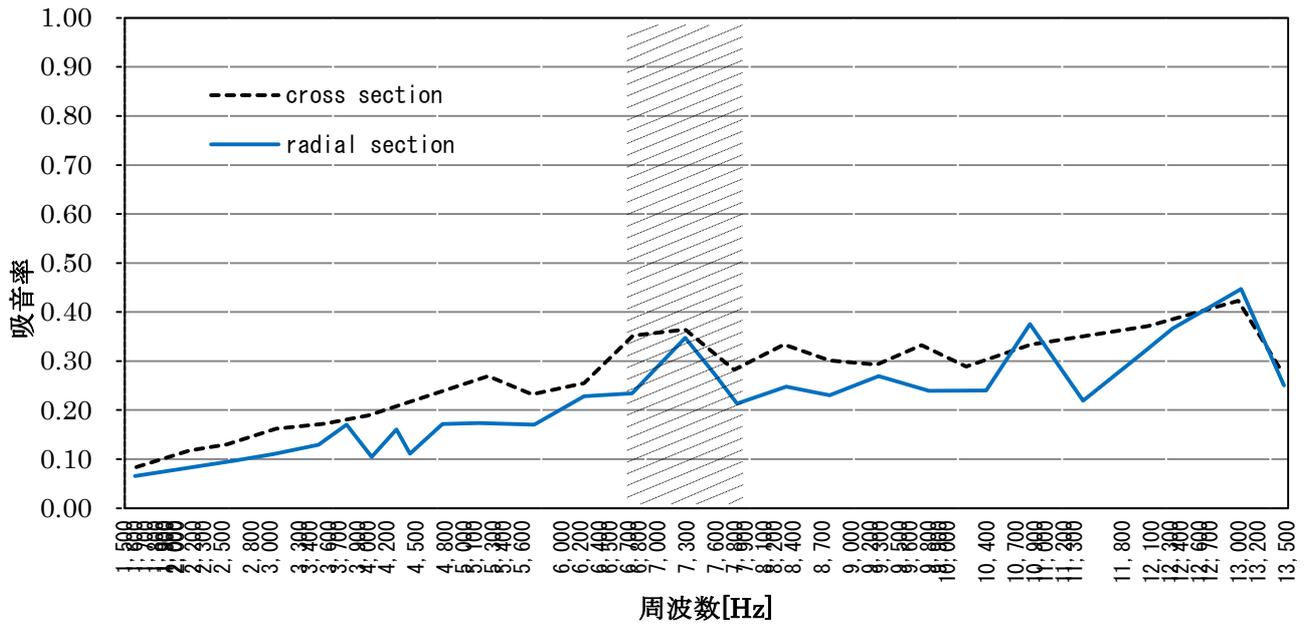


図 30 バルサの吸音率

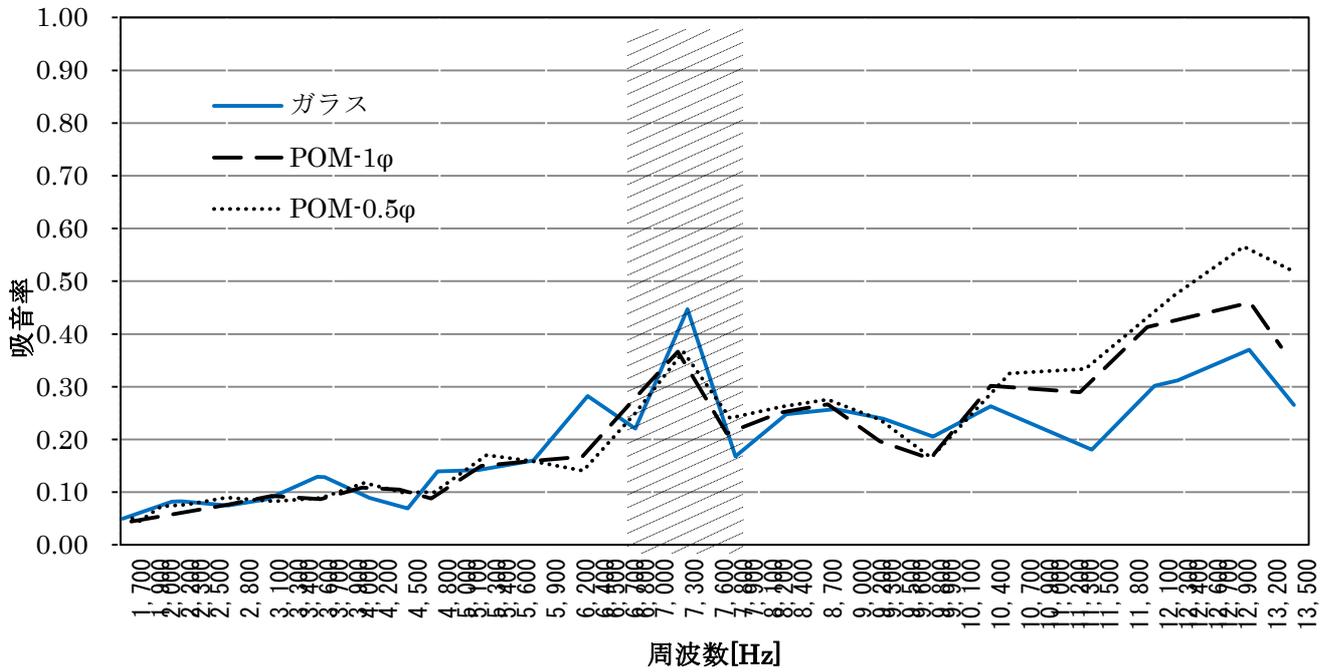


図 31 ガラス・POM の吸音率

第3章 吸音特性と木材組織構造の関係

1 共鳴周波数の算定

1-1 板型吸音機構による算定

1-2 共鳴器型吸音機構による算定

1-2-1 気柱の共鳴

1-2-2 共鳴器型吸音機構の応用

1-2-3 算定方法についての考察

1-3 資料の計測

1-4 算定結果

1-4-1 スギ

1-4-2 ヒノキ

1-4-3 キリ

1-4-4 ミズナラ

1-4-5 バルサ

2 吸音率の算定

2-1 算定式

2-2 算定結果

2-2-1 スギ

2-2-2 ヒノキ

2-2-3 キリ

2-2-4 ミズナラ

2-2-5 バルサ

2-3 まとめ

吸音特性を規定する要因として主体となるのは共鳴周波数と吸音率である。第2章で掲げた吸音率のグラフにおいて、ピークを示す位置が共鳴周波数、その大きさが吸音率である。本章ではこれらを木材の材料特性からの推定を試みて、木材組織との関係を考察した。

1 共鳴周波数の算定

音響工学の分野では、共鳴周波数を求めるにはその吸音がどの機構によるものか判別し、それぞれに応じた算定式によって算出する。木材は明らかに繊維状の多孔質型吸音機構ではないので、その吸音機構は板型吸音機構か共鳴器型吸音機構のいずれかに該当する。

本節ではまずはじめに板型吸音機構の検証を行い、続いて共鳴器型吸音機構の検討をおこなった。

1-1 板型吸音機構による算定

板型吸音機構で背後に空気層がない場合の共鳴周波数 f_0 は式 (19) となる。

$$f_0 = \frac{1}{2\rho} \sqrt{\frac{K}{m}} \quad \dots (19)$$

K : 板の剛性

m : 試料の面密度 [kg/m²]

ここに、板の剛性 K としてせん断弾性率を用いて計算した結果を表2にまとめた。

得られた共鳴周波数はいずれも製作した測定器の測定範囲より低かった。しかし、JIS機の測定結果(図12)と比較すると、スギとミズナラの木口面に関しては250Hzで見られる小さなピークと合致した。従って、スギとミズナラの木口面は若干の板型吸音機構による吸音を含んでいることがわかった。

柾目面の吸音率については、JIS機では測定を行わなかったため確認はできない。しかし、計算結果をみると、木口面より柾目面の方が吸音率は高いことが判った。本測定器による1500Hz以上の測定結果では、総じて柾目面は木口面より吸音率は低いので、1500Hz以上では板型吸音機構は生じていないという結論が導かれる。

表3 板型共鳴周波数

試料厚 1 [cm]

	スギ		ミズナラ		バルサ	
	木口	柾目	木口	柾目	木口	柾目
せん断弾性率[10 ³ kg/cm ²]	0.15	6.5	1.5	9.5	0.2	2.1
密度 [g/cm ³]	0.331	0.357	0.557	0.654	0.16	0.145
共鳴周波数 [Hz]	107	215	241	606	177	605

1-2 共鳴器型吸音機構による算定

木材の吸音機構を共鳴器型とみなすための根拠は、その組織構造にある。つまり、道管や仮道管を直管とみなし、木口断面はこの直管の集合体であると仮定した。したがって、木材を構成する各直管の断面形状と寸法、長さ、分布が判れば、吸音特性も算定できるのではないかと考えた。

直管の共鳴周波数を求めるための最も基本的なモデルは、高校の物理でも学習する「気柱の共振」である。本節ではまずこの気柱の共振による共鳴周波数を求め、続いて音響工学の理論から導かれた共鳴周波数を検討した。その際、はじめにPOMをモデルとして検討し、それぞれの理論の有効性を確認した。

1-2-1 気柱の共鳴

木材の組織を構成する道管や仮道管を1端閉管の直管に例えるなら(図13(c))、ある周波数で図のような共鳴が発生する。このとき、共鳴周波数 f_0 は(20)のように表される。

$$f_0 = \frac{c}{4(l+d)} \quad \dots (20)$$

c : 音速 = 343.5m/s (20°C)

l : 管の長さ

δ : 補正係数 $\delta = 0.8$ d : 管の直径

ここに、管の長さ $l = 5 \times 10^{-3}$ 、管の直径 $d = 1\text{mm}$ 、 0.5mm とすると、 $\phi 1$ の POM の共鳴周波数は 15,902Hz、 $\phi 0.5$ は 16,514Hz となった。

1-2-2 共鳴器型吸音機構の応用

図 14 は孔あき板を壁に取り付けたときの共鳴器のモデルで、(a) において、左から圧力がかかるとネックの部分の空気が固まりとなって、右の空洞部分の空気を振動させる。このとき、共鳴周波数は式 (21) で求められる。

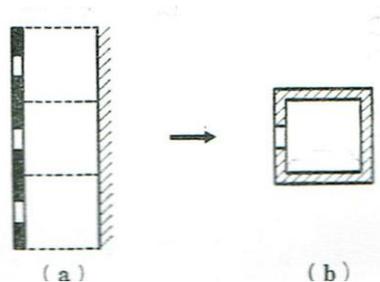


図 32 共鳴器型吸音機構のモデル

$$f_0 = \frac{c}{2\rho} \sqrt{\frac{p}{t'L + \frac{pL^2}{3}}} \quad \dots(21)$$

c : 音速 = 343.5m/s (20°C)

p : 孔あき板の開孔率で、 $p = s/S$

L : 背後空気層の厚さ

s : 開口断面積

t' : 孔の実効長で、 $t' = t + 0.8d$

ここで、直管の共鳴周波数を求める条件を次のように設定した。

直管は長さ方向の断面積が一定であるので、 $s = S \therefore p = 1$

ネックの部分の厚さは最大でも孔の直径であると仮定し、 $t = d$ 。

ゆえに、直管の全長を l とすると、 $L = l - d$

これらを (21) に入れ直すと、直管の場合の共鳴周波数は (22) 式となる。

$$f_0 = \frac{c}{2\rho} \sqrt{\frac{1}{(l-d)(0.8d+l)}} \quad \dots(22)$$

1-2-3 算定方法についての考察

式(22)によって、POMの共鳴周波数を求めると、 $\phi 1$ の場合は11356Hz、 $\phi 0.5$ の場合は11096Hzとなった。気柱の共振の方法によって求めた結果と合わせて測定結果を表2にまとめる。

表 4 POM の共鳴周波数

[Hz]

	気柱の共振	共鳴器型吸音機構	測定値
POM $\phi 1$	15,902	11,356	12,850
POM $\phi 0.5$	16,514	11,096	13,000

表(22)より、POM $\phi 1$ も $\phi 0.5$ も測定値は2つの算定方法による共鳴周波数の間に位置し、共鳴器型吸音機構による計算結果と比較的近い値となった。

気柱の共振による算定方法は、直管の内部摩擦や直径の影響を考慮しない純粋な理論値であるため、測定値より高くなることは容易に推測され、表からもそれが明らかとなった。算定結果の15,902Hz や 16,514Hz からこれらの影響を減ざると測定値となるのか、あるいは約 16,000Hz は測定値の次に現れるピークなのかは本装置の測定域を超えているため確認できない。仮に、測定によってこの共鳴周波数を確認するなら、表 1 より、内径 12mm の音響管が必要となり、この場合マイクロフォンの占有率が 50% をこえてしまい、音響管としての必要条件を大きく逸脱することになるため不可能である。しかし、少なくとも、気柱の共振によって算定される値は共鳴周波数の上限値とみなすことができる点で意味がある。

共鳴器型吸音機構による算定方法では、共鳴周波数は気柱の共振による方法の約 70% 程度となった。直管の太さや空気の圧力の影響はかなり大きく作用していると考えられる。測定値はこの共鳴器型吸音機構による算定値よりも 10% 強大きいのは、実際には共鳴器型吸音機構以外の吸音機構も作用していることや、装置の誤差などが考えられる。

POM では試料の孔が貫通しており、孔内の空気は直接剛壁に接触している。共鳴器型吸音機構では穿孔を通過した空気は大きな空気層を介して剛壁に到達することを前提としているため、POM と理論とでは端部条件の違いからこのような差が生じたとも考えられる。

しかし、大局的に見れば、式(22)による算定結果は測定値と近似していると見なすことができ、この式を用いて木材の共鳴周波数を算定することとした。

1-3 試料の計測

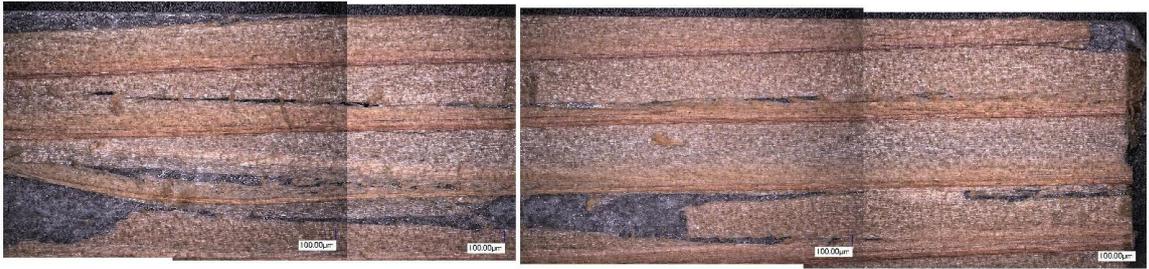
共鳴周波数の算定にあたっては、対象とする試料の道管の直径 d 、長さ l 、開孔率が必要となるため、次の方法によって計測した。

道管の直径と長さは、第2章で吸音率を測定した試料と同じ木材の固まりから、柾目面の薄い切片をカンナで削り出し、プレパラートに貼り、光学顕微鏡で写真を撮影した。その写真を基に道管の直径と長さを求めた。撮影した切片の大きさは約 $1\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ で、この範囲に少なくとも年輪が2本入るように、即ち1年分の組織が含まれるようにした。

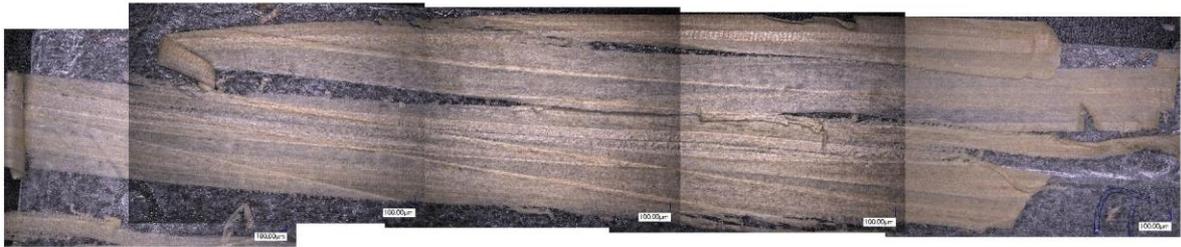
広葉樹のキリ、ミズナラ、バルサは $\times 20$ の倍率でほぼ撮影範囲の道管の計測はできたが、針葉樹のスギとヒノキは $\times 300$ 、 $\times 500$ でも道管は明瞭に観察できなかった。

開孔率は、吸音率を測定した試料の表面を光学顕微鏡（キーエンス VHX-1000）で撮影し、顕微鏡付属のソフトで道管の断面を計測して求めた。スギは早材と晩材が明瞭であったので、それぞれの開孔率を計測できたが、他の試料は早材部のみの計測となった。キリやバルサの道管内に見られたチロースは無いものとして計測した。

なお、算定に用いた道管長さは、測定値 L の $1/2$ 長とした。道管の両端が閉じた状態の時、その長さは L とみなせるが、木口断面で観測されるのは道管が切断され孔の開いた状態である。この孔が開いた状態を平均的に道管長さの $1/2$ とおいた。



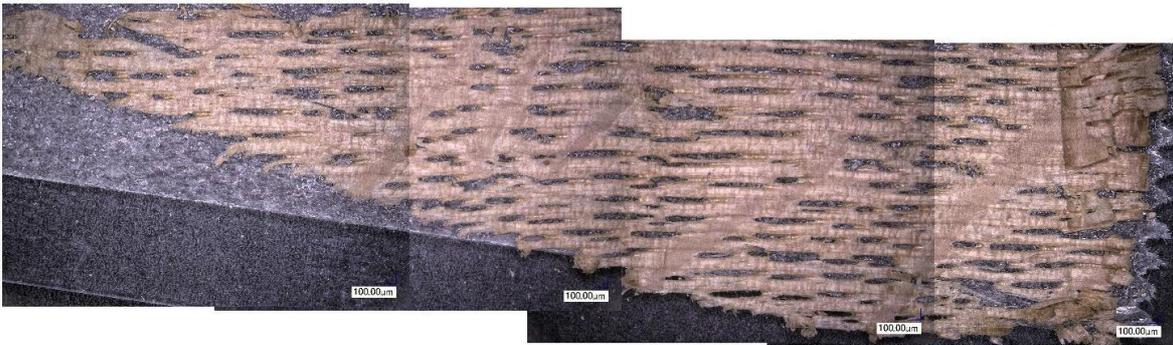
スギ20年経目 2015/11/2



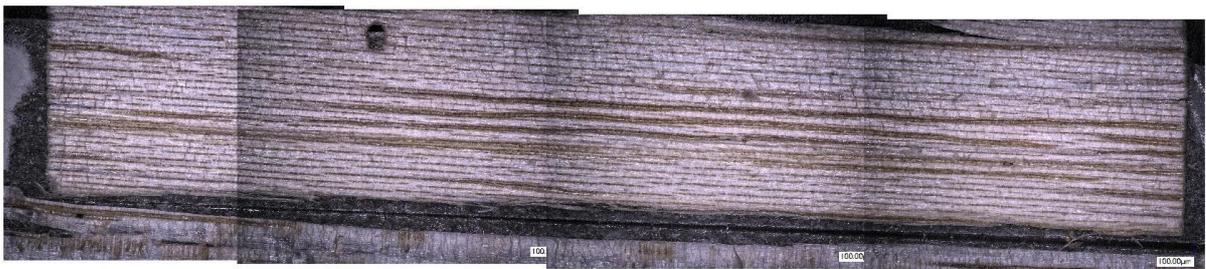
ヒノキ 20年経目 2015/11/2 S=6:1



キリ経目 2015/11/2



ミズナラ 20年経目 2015/11/2 S=60:1



20年経目 2015/11/2

0 0.1 0.2 1mm

バルサ 20年経目 2015/11/2 S=60:1

図 33 道管計測用の試料 上からスギ・ヒノキ・キリ・ミズナラ・バルサ

1-4 算定結果

今回の試料の中で、早材と晩材を分けて計測できたのはスギだけである。他の木材は年輪界が不鮮明で、晩材部分はほとんど計測することはできなかった。

表 5~9 に算定結果を示した。表は共鳴周波数の算定値を小さい順に並べ、その左の欄に対応する道管または仮道管の直径と長さを記した。

1-4-1 スギ

スギの仮道管は晩材で $9.4\mu\text{m}$ ~ $25\mu\text{m}$ 、早材で $18.8\mu\text{m}$ ~ $50\mu\text{m}$ 、長さは $50\mu\text{m}$ ~ 1.04mm であった。算定された共鳴周波数は晩材部で 206, 174Hz~852, 850Hz、早材部で 106, 052Hz~2, 422, 600

Hz と、測定機の測定範囲をはるかに超えるものとなった。理由は今回測定に用いた試料の仮道管寸法が非常に小さいためである。

第 2 章の測定結果では、スギの吸音率が高音域になるにつれ、もっとも高くなるという結果になったが、計算上では確認できなかった。スギの吸音に関しては、共鳴器型吸音機構とは別の機構の可能性が予測される。

1-4-2 ヒノキ

ヒノキの組織構造は非常に不鮮明であったため、今回は比較的仮道管径の太く、長いものしか計測値として挙げられなかった。このため、共鳴周波数は直径 $100\mu\text{m}$ 、長さ $650\mu\text{m}$ の 8, 269Hz~直径 $300\mu\text{m}$ 、長さ $6650\mu\text{m}$ の 86, 323Hz となり、スギに比べてはるかに低い。13, 500Hz 以下では、8, 269Hz、9, 551Hz、10, 553Hz、11, 485Hz、11, 589Hz、11, 840Hz が算出されたが、図 27 の測定値と比較すると、8, 182Hz、9, 743Hz、11, 284Hz のピークが近似値として対応していることが判る。

実際には細く短い仮道管がたくさん集合した構造をしているので、共鳴周波数はスギよりも高い値を呈するものと推測される。

1-4-3 キリ

キリは目視でも判るような太く長い道管が多く、測定値では直径 $150\mu\text{m}$ ~ $500\mu\text{m}$ 、長さは $600\mu\text{m}$ ~ 24.8mm 等であった。したがって、厚さ 10mm の試料を貫通している道管もあることになる。共鳴周波数も 4, 432~62, 500Hz と、スギと比較するとかなり低くなっている。中でも、算定値の 4, 514Hz、7, 960Hz、9, 646Hz、13, 870Hz は、測定値の 5, 081Hz、8, 300Hz、9, 800Hz、13000Hz とよい近似性を示した。

ひとつだけ算定値が 255, 028Hz と突出した値があるが、これは長さが $600\mu\text{m}$ と極端に短い道管のものである。

1-4-4 ミズナラ

ミズナラの道管は非常に鮮明で計測しやすかった。道管はまばらな分布であり、直径は20~90 μm 、長さは120~740 μm と短いのが特徴である。このため、共鳴周波数の算定値は120,806~3,000,000Hz以上と非常に高くなった。測定では、10,800Hzと13,000Hzにピークがみられるので、共鳴器型吸音機構とは異なる吸音機構による吸音が作用していると考えられる。

1-4-5 バルサ

バルサの組織構造は、長いが細い道管がまばらに分布しているのが特徴で、このため、共鳴周波数の算定値は13,700~1,300,000Hzの高い値を示した。しかし、測定値では13,00Hzにピークが見られることから、ミズナラと同様に共鳴器型吸音機構とは異なる吸音機構が作用していると考ええる。

表5 スギの共鳴周波数算定値

d:道管径[m]	L:道管長[m]	共鳴周波数[Hz]	d:道管径[m]	L:道管長[m]	共鳴周波数[Hz]
0.000019	0.000938	106,052	0.000031	0.000438	295,285
0.000031	0.000438	117,233	0.000025	0.000294	297,873
0.000031	0.000738	122,064	0.000009	0.000388	309,871
0.000019	0.000456	127,750	0.000019	0.000300	321,270
0.000044	0.000638	130,916	0.000019	0.000456	327,188
0.000038	0.000906	144,273	0.000016	0.000388	329,464
0.000038	0.000656	149,212	0.000025	0.000150	329,464
0.000031	0.000450	150,044	0.000025	0.000206	341,173
0.000038	0.000769	155,902	0.000022	0.000169	341,173
0.000031	0.000844	169,544	0.000019	0.000219	342,424
0.000019	0.000706	175,369	0.000019	0.000388	345,290
0.000025	0.000281	187,063	0.000019	0.000156	349,296
0.000050	0.000356	193,290	0.000031	0.000194	356,452
0.000025	0.000519	204,195	0.000025	0.000450	371,685
0.000013	0.000344	206,174	0.000025	0.000538	375,429
0.000025	0.000481	213,756	0.000025	0.000325	383,543
0.000025	0.000069	219,208	0.000016	0.000325	385,044
0.000025	0.000500	221,919	0.000019	0.000188	388,289
0.000025	0.000250	226,692	0.000044	0.000388	401,361
0.000031	0.000594	230,733	0.000019	0.000181	406,458
0.000025	0.001038	231,937	0.000013	0.000288	406,458
0.000044	0.000425	232,735	0.000025	0.000469	406,523
0.000019	0.000475	239,111	0.000009	0.000294	416,200
0.000019	0.000400	241,613	0.000013	0.000356	424,265
0.000016	0.000263	242,432	0.000031	0.000231	454,238
0.000031	0.000481	242,432	0.000019	0.000338	502,145
0.000038	0.000219	243,641	0.000019	0.000275	515,201
0.000019	0.000325	247,098	0.000028	0.000544	546,494
0.000041	0.000513	248,529	0.000019	0.000313	557,698
0.000031	0.000463	255,855	0.000019	0.000319	605,650
0.000025	0.000375	255,855	0.000019	0.000275	611,611
0.000019	0.000388	259,291	0.000019	0.000463	627,762
0.000050	0.000294	267,644	0.000009	0.000131	685,478
0.000019	0.000488	277,082	0.000013	0.000425	735,584
0.000022	0.000156	283,954	0.000019	0.000269	745,796
0.000016	0.000325	285,370	0.000031	0.000575	793,634
0.000019	0.000338	286,177	0.000019	0.000288	852,850
0.000025	0.000456	286,177	0.000025	0.000863	2,422,601

表6 ヒノキの共鳴周波数算定値

d:道管径[m]	L:道管長[m]	共鳴周波数 f ₀
0.000300	0.013300	8,269
0.000200	0.011500	9,551
0.000150	0.010400	10,553
0.000300	0.009600	11,485
0.000250	0.009500	11,589
0.000250	0.009300	11,840
0.000200	0.007800	14,112
0.000300	0.007500	14,742
0.000150	0.006800	16,172
0.000250	0.006800	16,243
0.000250	0.006400	17,271
0.000200	0.005700	19,367
0.000200	0.005400	20,456
0.000150	0.005200	21,188
0.000200	0.003900	28,465
0.000200	0.003600	30,887
0.000150	0.003500	31,622
0.000150	0.003500	31,622
0.000100	0.003300	33,402
0.000150	0.003300	33,569
0.000200	0.002900	38,557
0.000100	0.002700	40,911
0.000100	0.002600	42,505
0.000100	0.002600	42,505
0.000200	0.002600	43,161
0.000100	0.002000	55,480
0.000200	0.002000	56,780
0.000150	0.001900	59,119
0.000100	0.001700	65,493
0.000150	0.001600	70,732
0.000150	0.001600	70,732
0.000100	0.001300	86,323

表7 キリの共鳴周波数算定値

d:道管径[m]	L:道管長[m]	共鳴周波数 f ₀
0.000500	0.024800	4,432
0.000300	0.024300	4,514
0.000500	0.015600	7,070
0.000400	0.015400	7,149
0.000250	0.013800	7,960
0.000250	0.011400	9,646
0.000400	0.010500	10,524
0.000400	0.008000	13,870
0.000250	0.006800	16,243
0.000300	0.004500	24,823
0.000150	0.004400	25,081
0.000200	0.004300	25,772
0.000200	0.004200	26,396
0.000300	0.004200	26,652
0.000400	0.004100	27,660
0.000250	0.003900	28,610
0.000500	0.003800	30,482
0.000250	0.003300	33,987
0.000200	0.003100	36,000
0.000150	0.003000	36,986
0.000300	0.002800	40,724
0.000200	0.002500	44,953
0.000200	0.002100	53,934
0.000150	0.001800	62,537
0.000150	0.001800	62,537
0.000200	0.000600	255,028

表8 ミズナラの共鳴周波数算定値1

d:道管径	L:道管長	共鳴周波数[Hz]	d:道管径	L:道管長	共鳴周波数[Hz]
0.000050	0.000920	120,806	0.000020	0.000400	277,398
0.000050	0.000920	120,806	0.000030	0.000400	280,297
0.000050	0.000740	151,008	0.000036	0.000400	282,369
0.000060	0.000740	151,949	0.000040	0.000400	283,899
0.000070	0.000680	167,278	0.000040	0.000400	283,899
0.000300	0.000900	170,019	0.000040	0.000400	283,899
0.000060	0.000640	176,830	0.000040	0.000400	283,899
0.000060	0.000620	182,833	0.000044	0.000400	285,553
0.000046	0.000600	187,010	0.000050	0.000400	288,281
0.000060	0.000600	189,266	0.000050	0.000400	288,281
0.000060	0.000600	189,266	0.000020	0.000380	292,287
0.000036	0.000580	192,217	0.000040	0.000380	299,740
0.000040	0.000580	192,783	0.000040	0.000380	299,740
0.000040	0.000580	192,783	0.000070	0.000400	299,830
0.000048	0.000560	201,250	0.000054	0.000380	307,138
0.000056	0.000540	210,738	0.000054	0.000380	307,138
0.000060	0.000540	211,662	0.000066	0.000380	315,233
0.000050	0.000520	217,920	0.000090	0.000400	316,218
0.000054	0.000520	218,861	0.000040	0.000360	317,494
0.000052	0.000500	227,636	0.000040	0.000360	317,494
0.000054	0.000500	228,169	0.000052	0.000360	324,771
0.000060	0.000500	229,870	0.000022	0.000340	328,261
0.000020	0.000480	230,481	0.000060	0.000360	330,681
0.000040	0.000480	234,513	0.000060	0.000360	330,681
0.000040	0.000480	234,513	0.000040	0.000340	337,536
0.000040	0.000480	234,513	0.000040	0.000340	337,536
0.000046	0.000480	236,039	0.000040	0.000340	337,536
0.000046	0.000480	236,039	0.000050	0.000340	344,562
0.000050	0.000480	237,144	0.000060	0.000340	353,218
0.000056	0.000460	250,141	0.000060	0.000340	353,218
0.000060	0.000460	251,606	0.000060	0.000340	353,218
0.000060	0.000460	251,606	0.000060	0.000340	353,218
0.000040	0.000440	256,821	0.000040	0.000320	360,351
0.000040	0.000440	256,821	0.000040	0.000320	360,351
0.000050	0.000440	260,169	0.000040	0.000320	360,351
0.000056	0.000440	262,474	0.000040	0.000320	360,351
0.000056	0.000440	262,474	0.000040	0.000320	360,351
0.000060	0.000440	264,143	0.000040	0.000320	360,351
0.000060	0.000440	264,143	0.000046	0.000320	365,176
0.000060	0.000430	270,909	0.000050	0.000320	368,770
0.000050	0.000420	273,487	0.000050	0.000320	368,770
0.000050	0.000420	273,487	0.000050	0.000320	368,770
0.000050	0.000420	273,487	0.000050	0.000320	368,770

表8 ミズナラの共鳴周波数算定値2

d:道管径	L:道管長	共鳴周波数[Hz]	d:道管径	L:道管長	共鳴周波数[Hz]
0.000050	0.000320	368,770	0.000042	0.000220	553,523
0.000060	0.000320	379,259	0.000044	0.000220	558,743
0.000060	0.000320	379,259	0.000020	0.000200	567,797
0.000060	0.000320	379,259	0.000050	0.000220	576,562
0.000032	0.000300	379,983	0.000050	0.000220	576,562
0.000040	0.000300	386,576	0.000050	0.000220	576,562
0.000046	0.000300	392,430	0.000030	0.000200	587,093
0.000050	0.000300	396,817	0.000040	0.000200	614,617
0.000050	0.000300	396,817	0.000040	0.000200	614,617
0.000050	0.000300	396,817	0.000040	0.000200	614,617
0.000030	0.000280	407,239	0.000040	0.000200	614,617
0.000040	0.000280	417,064	0.000060	0.000220	615,394
0.000050	0.000280	429,744	0.000020	0.000180	634,987
0.000050	0.000280	429,744	0.000020	0.000180	634,987
0.000050	0.000280	429,744	0.000020	0.000180	634,987
0.000020	0.000260	431,613	0.000050	0.000200	653,760
0.000056	0.000280	439,012	0.000050	0.000200	653,760
0.000030	0.000260	440,765	0.000030	0.000180	661,362
0.000060	0.000280	446,009	0.000040	0.000180	700,329
0.000060	0.000280	446,009	0.000040	0.000180	700,329
0.000060	0.000280	446,009	0.000040	0.000180	700,329
0.000036	0.000260	447,691	0.000060	0.000200	710,896
0.000036	0.000260	447,691	0.000020	0.000160	720,702
0.000040	0.000260	452,990	0.000020	0.000160	720,702
0.000040	0.000260	452,990	0.000020	0.000160	720,702
0.000046	0.000260	462,093	0.000046	0.000180	732,287
0.000016	0.000240	465,427	0.000050	0.000180	758,517
0.000050	0.000260	469,027	0.000050	0.000180	758,517
0.000020	0.000240	469,027	0.000040	0.000160	817,199
0.000050	0.000260	469,027	0.000040	0.000160	817,199
0.000030	0.000240	480,468	0.000040	0.000160	817,199
0.000030	0.000240	480,468	0.000026	0.000144	837,171
0.000060	0.000260	490,014	0.000040	0.000140	988,795
0.000040	0.000240	496,021	0.000020	0.000120	992,043
0.000060	0.000250	515,807	0.000030	0.000120	1,089,599
0.000030	0.000220	528,287	0.000040	0.000120	1,275,141
0.000030	0.000220	528,287	0.000040	0.000120	1,275,141
0.000030	0.000220	528,287	0.000030	0.000100	1,421,793
0.000036	0.000220	539,705	0.000050	0.000120	1,729,685
0.000036	0.000220	539,705	0.000030	0.000080	2,162,107
0.000040	0.000220	548,623	0.000020	0.000050	3,820,236
0.000040	0.000220	548,623			
0.000040	0.000220	548,623			

表9 バルサの共鳴周波数算定値

d:道管径	L:道管長	共鳴周波数 [Hz]	d:道管径	L:道管長	共鳴周波数[Hz]
0.000050	0.007960	13,761	0.000010	0.000660	166,316
0.000060	0.007300	15,012	0.000010	0.000660	166,316
0.000040	0.006200	17,668	0.000010	0.000660	166,316
0.000150	0.005600	19,663	0.000050	0.000600	187,611
0.000060	0.005040	21,762	0.000010	0.000580	189,356
0.000080	0.004340	25,314	0.000010	0.000560	196,150
0.000050	0.003340	32,863	0.000020	0.000520	212,523
0.000060	0.003100	35,447	0.000010	0.000500	219,812
0.000070	0.002600	42,353	0.000010	0.000500	219,812
0.000040	0.002540	43,222	0.000010	0.000460	239,038
0.000040	0.002500	43,917	0.000010	0.000440	249,971
0.000050	0.002400	45,804	0.000010	0.000440	249,971
0.000030	0.002320	47,288	0.000010	0.000420	261,953
0.000040	0.002260	48,602	0.000010	0.000400	275,143
0.000060	0.001960	56,244	0.000010	0.000400	275,143
0.000050	0.001900	57,947	0.000010	0.000360	305,959
0.000080	0.001900	58,236	0.000010	0.000360	305,959
0.000040	0.001800	61,096	0.000010	0.000360	305,959
0.000040	0.001600	68,786	0.000020	0.000360	308,872
0.000030	0.001500	73,271	0.000010	0.000300	367,769
0.000020	0.001480	74,138	0.000010	0.000280	394,334
0.000100	0.001000	113,559	0.000010	0.000260	425,047
0.000010	0.000920	119,189	0.000010	0.000240	460,963
0.000020	0.000900	122,191	0.000010	0.000220	503,531
0.000010	0.000820	133,767	0.000010	0.000220	503,531
0.000010	0.000800	137,121	0.000010	0.000200	554,797
0.000020	0.000800	137,572	0.000010	0.000200	554,797
0.000010	0.000740	148,276	0.000010	0.000180	617,745
0.000060	0.000700	161,000	0.000010	0.000160	696,910
0.000010	0.000680	161,406	0.000010	0.000120	938,054
0.000010	0.000660	166,316			

2 吸音率の算定

吸音率を求めるには、空気の運動方程式を立て、対象とする構造体の音響インピーダンスを表す式を導いて計算しなければならない。この過程に多くの方式があり、非常に複雑であるのでその解説は省略し、以下に算定式を記す。

2-1 算定式

本研究で取り上げる木材の木口断面を、道管部分を穿孔、道管周囲やその背後の部分を多孔質材料とみなしたとき、この組み合わせで構成された構造体の垂直入射で共鳴器型吸音機構による吸音で背後に空気層をもたない構造体の吸音率 α 波は式(23)で表すことができる。

$$\alpha = 8 \left[\frac{R+2}{R(R+1)^2} - \frac{2}{R^2} \log_e(R+1) \right] \quad \dots (23)$$

R : 吸音体の抵抗比

$$R = R_0 / \rho c$$

R_0 : 構造体の総合抵抗で、 $R_0 = rl \times 1.15^n$

r : 構造体の単位長さ当たりの流れ抵抗

l : 構造体の厚さ

rl : その構造体の流れ抵抗 [$\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$]

$$n = \frac{1}{0.35} \log_{10} \frac{30}{p \times 100}$$

p : 構造体の穿孔部分の開孔率

ここで、r は測定しなかったため文献値を参照した。参照元の文献にも同じ樹種のみはバルサのみだったので、似た樹種としてスギとヒノキは Pine、キリは Poplar、ミズナラは Oak の値を引用した。また、これら引用元の流れ抵抗値は柎目方向の値であったので、表 2 をもとに、木口方向密度/柎目方向密度 の値を文献の流れ抵抗値に乗じて木口断面の流れ抵抗値とした。表 10 に流れ抵抗の算定経過を記す。

表 10 流れ抵抗の算定

密度	[g/cm ³]	Sugi	Hinoki	Kiri	Mizunara	Balsa
Cross section		0.331	0.498	0.224	0.557	0.16
Radial section		0.357	0.498	0.302	0.654	0.145
		Sugi	Hinoki	Kiri	Mizunara	Balsa
Cross section/Radial		0.927	1.000	0.742	0.852	1.103
		Pine LR	Pine LR	Popular LR	Oak LR	Balsa LT
比重の変換		0.494	0.494	0.36	0.688	0.082
Cross section		0.458	0.494	0.267	0.586	0.090
Radial section		0.494	0.494	0.360	0.688	0.082

	Pine LR	Pine LR	Popular LR	Oak LR	Balsa LT
単位長さあたりの流れ抵抗 r[Nsec/m ⁴]	35540	35540	17394	197525	1937
〃 単位変換[dyne・sec/cm ⁴]	355400	355400	173940	1975250	19370
Cross section	329516.5 27	355400.0 00	129015.0 99	1682284.7 86	21373.793
Radial section	355400.0 00	355400.0 00	173940.0 00	1975250.0 00	19370.000

×面積 φ15=1.767cm ²					
流れ抵抗 r _l					[dyne・sec/cm ²]
Cross section	582,256	627,992	227,970	2,972,597	37,767
Radial section	627,992	627,992	307,352	3,490,267	34,227

l=1cm

流れ抵抗 r _l					[dyne・sec/cm]
Cross section	582,256	627,992	227,970	2,972,597	37,767
Radial section	627,992	627,992	307,352	3,490,267	34,227

$$R_0 = r_l \quad R = R_0 / \rho c$$

$$\rho = 41.39 \text{ g/m}^2/\text{sec}$$

R					[dyne・m・sec ² /kg]
Cross section	14,067.0	15,171.9	5,507.6	71,816.2	912.4
Radial section	15,172.5	15,172.5	7,425.8	84,326.3	826.9

2-2 算定結果

表 11 に吸音率の算定結果を示す。算定で得られた吸音率 α は、共鳴周波数における最大吸音率とみなすことができる。

2-2-1 スギ

前節の共鳴周波数の算定では、スギの共鳴周波数は 100,000Hz 以上となった。測定値 (図 26) ではスギの吸音率は 13,000Hz で 0.59 を示し、表 11 の早材の値と同じとなった。したがって、スギの吸音率は 13000Hz でおおよそ最大の吸音率を迎え、以降横ばいに推移していくのではないかと推測される。

また、早材と晩材の差はほとんどないと言える。

2-2-2 ヒノキ

ヒノキの測定値からは最大吸音率は 12,380Hz の 0.56 となったが、これは表 11 の $\alpha = 0.57$ と極めて近い。さらに、共鳴周波数でも算定結果と測定結果はよい近似を示したことから、ヒノキでは、理論値と測定値が一致したと結果が得られた。

2-2-3 キリ

キリは共鳴周波数においては、算定値と測定値に近似性がみられたが、吸音率については算定値の方が倍以上大きい結果となった。これは、流れ抵抗値をキリの値ではなく、ポプラの値で代用したことが大きな原因ではないかと推測する。

2-2-4 ミズナラ

吸音率の算定結果は $\alpha = 0.14$ となり、これは測定グラフの 3000Hz~4000Hz の吸音率の値である。測定結果からは 13,000Hz でこの 3 倍の $\alpha = 0.43$ を呈しており、やはり、流れ抵抗値にオークの値を代用したことが影響していると考えられる。

2-2-5 バルサ

唯一流れ抵抗に固有の値を用いて算定された結果である。その算定値は 0.73 で、共鳴周波数の算定値も 13000Hz 以上であるので、本測定機の測定可能域以上の周波数で、理論値との一致をみる可能性がある。

表 11 吸音率の算定

	開孔率	r1	R	α
スギ 晩材	26.5	32.95	8.13	0.56
早材	52.1	32.95	7.31	0.59
ヒノキ	50.6	36.54	7.85	0.57
キリ	36.2	12.90	3.03	0.87
ミズナラ	8.3	168.23	50.97	0.14
バルサ	29.7	2.14	0.52	0.73

結果

2-3 まとめ

本章では吸音特性を共鳴周波数と吸音率にわけて理論値を求め、測定値と比較した。その結果、理論値と測定値に近似性がみられたのはヒノキであり、スギやミズナラ、バルサでは共鳴周波数が測定不可能な高い音域にあることが判った。また、ミズナラを除いては、吸音率の最大値は0.5以上の高い値を示し、このことから木材は高音域で優れた吸音性能をもっていることがわかった。

また、木材の組織構造との関係では、道管、仮道管の長さが共鳴周波数に大きな影響を与えるファクターであることも読みとれた。

第4章 木材の吸音特性の応用への提案

1. 応用への提案

第2章の結果から、木材の木口断面には、一般的な測定域の上限を超えた周波数域での吸音性能があることが確認され、また、第3章においてその根拠が理論的に証明された。さらに、本研究で用いた測定器の測定可能域 13500Hz を超えた、より高い周波数域における吸音性能もあることが推測される。

1 応用への提案

一般に人間の可聴域の上限は 20000Hz とされ、年齢が上がるに伴い可聴域も低下してくる。いわゆる老化現象のひとつである。このような身体的原因による難聴のほか、現代社会では日常的にさまざまな音波が飛び交っており、その様な雑音が妨害となって聞き取りにくくなっていることも考えられる。例えば、冷蔵庫、蛍光灯、テレビ、携帯電話、洗濯機、エアコン、エレベーターの振動など。

近年難聴が若年化されているのは、このような高周波数域の騒音の増加も原因のひとつと考えられる。したがって生活環境上の騒音を除去することにより、日常生活での「聞きやすさ」を確保することができるのではないかと推測される。

そこで、高い周波数域の騒音を削減するために、木材の木口断面の板を室内の仕上材に使用することを提案する。図 33 は約 2 畳の室内の壁面全体にスギ木口板を張った実験室である。この時は別の目的で実施した実験であるので、本研究と同レベルでの木材の吸音性能については論じられないが、使用者の感想は、木口面が多くて目障り、木の香りが強すぎる、音がこもって聞きにくいなど、芳しいものではなかった。

したがって、高い周波数の騒音の吸音材として使用するには、目立たないように着色するか、広い面積ではなく部分的に使用するなどの工夫が必要となる。たとえば図一に廻縁や長押のようにデザインした例を挙げる。この例のように線状に板を張る場合には、柱の端材が利用でき、材料の調達も容易である。

今後、室内の形状や大きさと木材の吸音性能の関係について研究することにより、木材の新たな利用についての具体的な提案が期待される。



図 34 木口面の板を施した室内（実例）

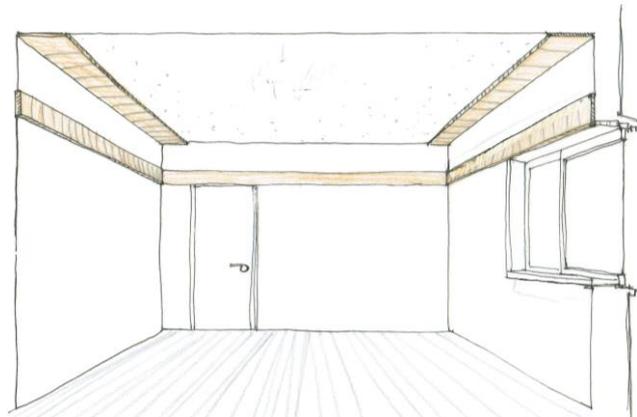


図 35 木口面の板を施した室内（提案）

文献

- 1) 渡辺治人, 松本昴, 木下叙幸, 林弘也: 木質材料の音響学的研究 (第1報). 木材学会誌 13(5), 117-182 (1967)
- 2) 小野和雄: “木材物理実験書” 農業図書, 東京, 1973, p. 36
- 3) JIS: 音響管による吸音率及びインピーダンスの測定—第1部: 定在波比法 JIS A 1405-1:2007, 日本規格協会, 5 (2007)
- 4) JIS: 音響管による吸音率及びインピーダンスの測定—第2部: 伝達関数法 JIS A 1405-2:2007, 日本規格協会, 5 (2007)
- 5) 子安勝: “建築音響シリーズ 吸音材料” 日本音響学会編, 技報堂出版, 東京, 1976, p. 1, 36
- 6) 前川純一: “建築環境音響学” 共立出版, 1990
- 7) 浅野猪久夫: “木材の事典” 朝倉書店 1999
- 8) 木村翔: “音響材料の吸音特性に関する実験的研究” 東京大学生産技術研究報告書第10巻 5号, 1961
- 9) Voichita Bucur : Acoustics of Wood, CRC Press, 19-20 (1995)
- 10) Voichita Bucur : Acoustics of Wood 2nd ed., Springer, 21-22 (2006)
- 11) Kang Chunwon, Matsumura Junji, Oda Kazuyuki, : 九州大学大学院農学研究院紀要, 1-4 (2006)
- 12) Chunwon Kang, Wook Kang, Heejun Park, Namho Lee, Soonsik Jeon, Taekwon Son : 第60回日本木材学会大会研究発表要旨集, 111 (2010)
- 13) 日本音響学会: 建築音響シリーズ 吸音材料, 技報堂出版, (1976)
- 14) 日本木材学会: 木質の物理, 文永堂出版, 253 (2007)
- 15) Uno Ingard : “Sound Absorption by Perforated Porous Tiles. 1, The Journal of the Acoustical Society of America” Vol.26 No.2, 1954
- 16) Jerzy Smardzewski, Edward Roszyk, Dorota Dziurka, Adam Majewski:” Experimental study of wood acoustic absorption characteristics: HOLZFORCHUNG : Nov.2013
- 17) 山口道征, 豊田政弘: “小特集「音響管による垂直入射吸音率測定」にあたって”、日本音響学会誌 68巻9号 (2012), pp. 461-462
- 18) 加藤大輔: “音響管の原理と計測量”, 日本音響学会誌 68巻9号 (2012), pp. 463-468
- 19) 小白井敏明, 立石覚: “多孔質材料の吸音率測定データに及ぼす赫々構造の影響” 日本音響学会誌 68巻9号 (2012), pp. 474-479
- 20) 青木健一, 鎌倉友男: 超音波領域における多孔質材料の音響特性, 日本音響学会誌 68巻9号 (2012), pp. 486-491

- 21) 山口道征：多孔質材料の吸音特性、日本音響学会誌 59 巻 9 号 (2003), pp. 328-336
- 22) N.H. フレッチャー, T.D. ロッシング／岸憲史・窪田秀美・吉川茂 訳：楽器の物理学, 丸善出版, 2012
- 23) 小野和雄：木材物理学実験書, 農業図書 1973
- 24) 船場ひさお, 太田篤史, 倉片憲治, 武田真樹：バリアフリーと音, 技報堂出版 2015
- 25) チャールズ・E・スピークス／荒井隆行, 菅原勉 訳：音入門 聴覚・音声科学のための音響学, 海文堂 2002
- 26) 平尾雅彦：音と波の力学, 岩波書店 2013
- 27) 日本建築学会：建築環境工学用教材, 丸善出版 2011
- 28) 子安勝：穿孔パネル多孔質吸音層組合わせ構造の吸音について, 東京大学理工学研究所 1954
- 29) Jerzy Smardzewski, Wojciech Batko, Tadeusz Kamisinski, Artur Flash, Artur Pilch, Dorota Dziurka, Radostaw Mirski, Edward Roszyk, Adam Majewski : Experimental study of wood acoustic absorption characteristics, DE GRUYTER 2014
- 30) 岩瀬昭雄：多孔質材料の吸音機構と吸音特性の計測技術 日本音響学会誌 54 巻 1 号 1998
- 31) C. ZWIKKER, C.W. KOSTEN : SOUND ABSORBING MATERIALS, ELSEVIER PUBLISHING COMPANY 1949

謝辞

本研究は2008年4月より8年にわたって続けられてきました。このたび漸く研究成果を博士論文としてまとめることができました。

この間、長きに渡り、温かくご指導くださいました信田聡教授、太田正光名誉教授には、心よりお礼を申し上げます。また、斎藤幸恵准教授には先生が生物材料物理学研究室にご在職の頃よりマイクロトームや顕微鏡の扱いなどを丁寧に教えていただきました。この秋には、研究者のあり方についての貴重なお話を伺わせていただき、大変励みとなりました。

前田先生はじめ、研究室の学生の皆様にも、たくさんの支援をいただき感謝しています。

最後に、長い間わがまを黙認してくれた家族にあらためてありがとうと伝えたいと思います。

2015年12月

山村いづみ