

垂直入射吸音率測定システム

WinZac

日東紡音響エンジニアリング株式会社

特徴

ISO 10534-2 に完全準拠．伝達関数法（2 マイクロホン法）により，高速な測定を実現



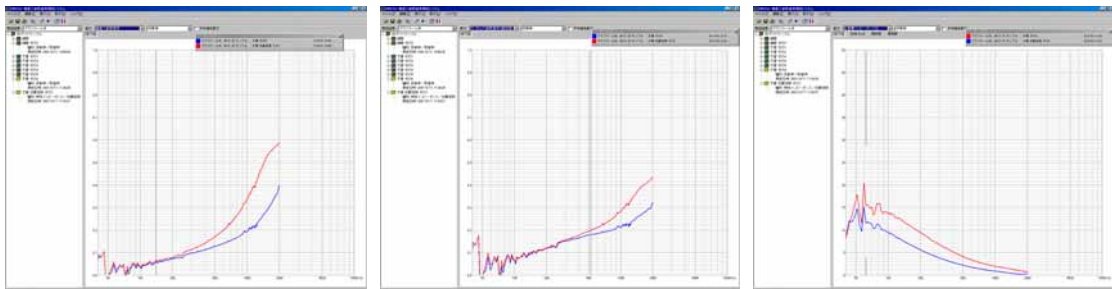
国際標準である，ISO 10534-2 に完全に準拠した測定を行います．音響管内の2点間の伝達関数を FFT 法を用いて測定することにより，従来の定在波比法に比べて大変スピーディに測定を進めることができます．

キャリブレーション（校正）も ISO 10534-2 に準拠

マイクロホンをはじめとする 2 チャンネルの測定系の誤差を補正するため，キャリブレーションのための測定を行います．この測定結果により，マイクロホンの感度差，位相差を測定周波数帯域すべてに渡って補正することが可能です．この測定方法も，ISO 10534-2 に準拠しています．

豊富な測定可能パラメータ

垂直入射吸音率をはじめ，伝達関数，複素音圧反射率，比音響インピーダンス比の計測をサポート．さらに，材料の局所作用を仮定したランダム入射吸音率の推定までも標準のソフトウェアで測定可能です．これらのパラメータの算出方法は全て ISO 10534-2 における算出方法に準拠しています．くわえて，2 種類の背後空気層での測定（2 cavity method）による多孔質材料の特性インピーダンス，伝搬定数，実効密度，体積弾性率の推定が可能です．



同一材料の垂直入射吸音率（左），ランダム入射吸音率（中央），比音響インピーダンス比（右）の測定例

特別なアナライザは不要！

分析は，サウンドカードをフロントエンドとする，Windows 上のソフトウェアですべて実行．特別な専用分析器や雑音発生器は必要ありません．その結果，コンパクトなシステム構成で測定できるため，現場に持ち出しでの測定などにも威力を発揮します．使用するサウンドカードは十分に吟味された，音響計測に耐えうるものを使用し，測定結果の信頼性を確保しています．また，ソフトウェアで分析器が校正されるため，オフィスアプリケーションへのリンクも良好．測定結果の管理が一段と容易になります．



使いやすいソフトウェアインターフェイス

サンプル主体のファイル設計のため，測定のバラツキを考慮して，同一サンプルで複数の測定が可能です．ある程度の回数の測定結果を平均処理することにより，安定した測定結果を得ることが出来ます．また，異なるサンプルのデータを比較・検討することも，グラフの重ね描き機能により容易です．さらに，1 / 1，1 / 3 オクターブバンドでのデータ表示もサポートしており，材料開発のプロセスを強力にサポートします．

主要な周波数帯域を1つの音響インピーダンス管で測定可能

吸音材評価の一般的な主要周波数帯域(200Hz~5000Hz、低周波対応オプション管により100Hz~5000Hz)を単一の音響管により同一サンプルで一度に測定することができます。これにより、異なる寸法のサンプルで測定することによる同一周波数の測定データのずれなどを気にする必要がありません。

透明なサンプル支持部を採用

音響インピーダンス管のサンプル支持部が透明なアクリル製なので、試料装着状態を目で見て確認することができ、誤った試料装着による測定ミスを低減できます。

緩支持サンプルホルダ(オプション)使用により材料の板振動の影響を大幅に低減

当社で開発した緩支持サンプルホルダ(オプション、特許申請中)を用いることで、従来問題となっていた吸音率測定時の材料の弾性によって生じる板振動の影響を大幅に低減することができます。

垂直透過管(オプション)により垂直入射音響透過損失測定を実現

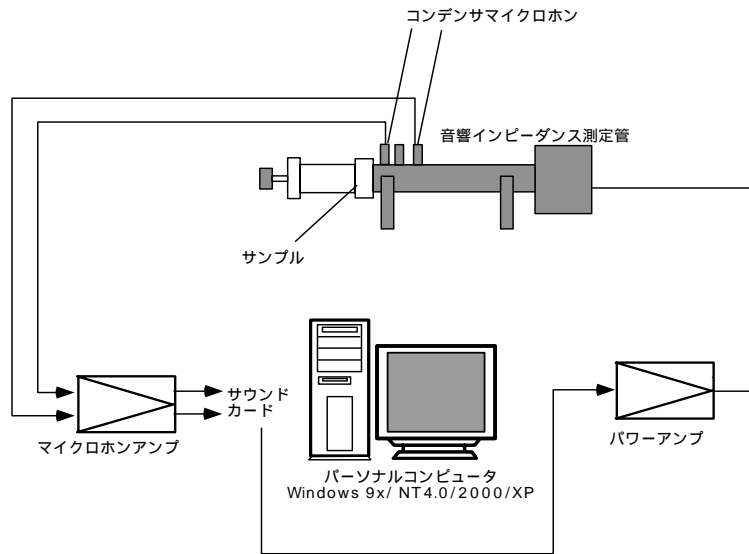
試料支持部を垂直透過管(オプション)に置き換えることにより、材料の垂直入射条件における音響透過損失を測定することができます。さらに、垂直透過管を用いて測定することにより、従来の測定方法では測定が難しかった減衰の大きな多孔質材料についても特性インピーダンス、伝搬乗数などの材料パラメータを推定できるようになります。

使用可能な音響管は様々なタイプに対応

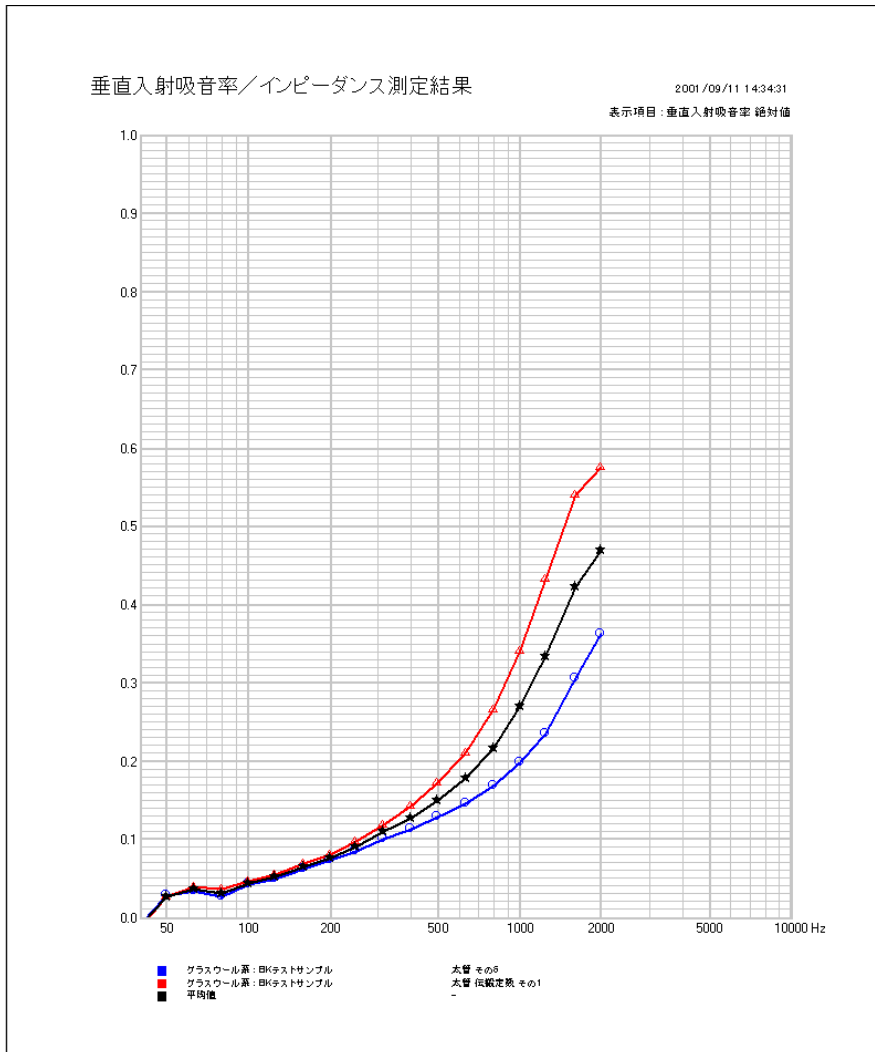
ソフトウェアは任意寸法の音響管に対応しておりますので、音響管を特別な仕様のもにに変更しても、音響管の断面形状や寸法など、ソフトウェア上での簡単なパラメータの変更により対応可能です。



機器構成の一例(音響管標準構成の場合)



測定結果出力の一例(垂直入射吸音率)



仕様

測定方法

伝達関数法 (ISO 10534-2 準拠)

音響インピーダンス測定管

形状：円形

内径：直径 40mm

本体：

長さ：約 400mm(低周波対応用オプション管の場合 600mm)

マイクロホン間隔：30mm , 50mm , 80mm(低周波対応用オプション管の場合、プラス 200mm)

標準試料支持部：

アクリル製(透明)

測定最大寸法：約 140mm

垂直透過管 (オプション)：

長さ：最大 600mm (200mm 管 3 本連結)

測定可能寸法：最大 50mm

緩支持ホルダ (オプション)：

内径：41mm (希望により変更可能)

測定可能寸法：最大 50mm

測定 (推定) 可能なパラメータ

反射法による測定：

垂直入射吸音率

伝達関数

複素音圧反射率

比音響インピーダンス比

ランダム入射吸音率 (推定値)

特性インピーダンス

伝搬定数

実効密度

体積弾性率

垂直入射透過損失 (推定値)

透過法による測定：

伝達マトリクス

垂直入射音響透過損失

剛壁密着垂直入射吸音率 (推定値)

特性インピーダンス

伝搬定数
実効密度
体積弾性率

測定周波数範囲

200Hz～約 5000Hz(Narrow, 当社音響インピーダンス管標準管使用時^{*}), 25)

100Hz～約 5000Hz(Narrow, 当社音響インピーダンス管低周波対応オプション管使用時^{*}), 25)

* 測定上限周波数は音響インピーダンス管の形, 内径によります。

キャリブレーション (校正)

マイクロホンスイッチングによる, 補正係数算出 (ISO 10534-2 準拠)

パーソナルコンピュータ

OS : Microsoft Windows 2000, XP

動作環境: 上記 OS が問題なく動作する環境 (CPU Pentium III 以上, RAM 128MB 以上を推奨)

サウンドカード

音響計測に問題ない特性を備えたサウンドカード (推奨機器は御相談下さい)。

Appendix. 本測定に関する基本理論

A1-1 管内の音場モデル

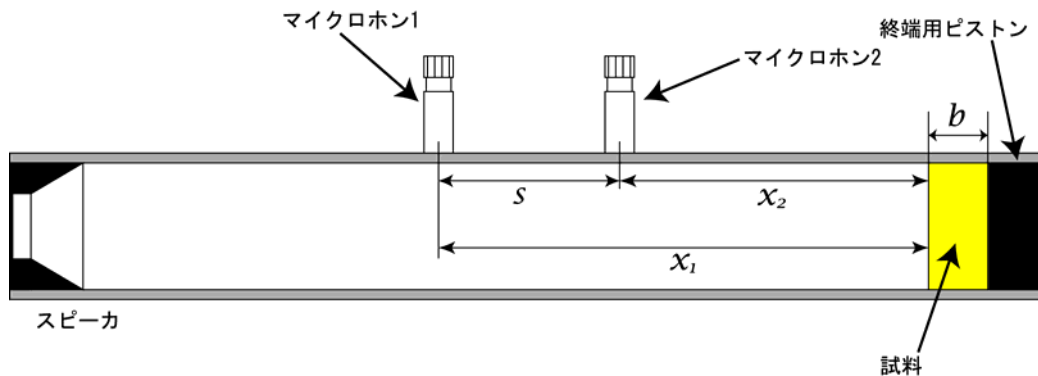


図 A1-1 管内音場のモデル

上図のように、管内に音源があり、それに対する面に試料が設置されている場合、波長が管の断面方向の寸法に比べて十分大きい場合には、管内の音場が長手方向の一次元音場でモデル化できます。

試料に入射する音波 p_I 、試料からの反射波 p_R は次式のように表せます。(ただし、時間項 $e^{j\omega t}$ は省略しています)

$$p_I = \hat{p}_I e^{jk_0 x} \quad (\text{A1-1})$$

$$p_R = \hat{p}_R e^{-jk_0 x} \quad (\text{A1-2})$$

ただし、 \hat{p}_I は試料表面 ($x=0$) における入射波の振幅、 \hat{p}_R は試料表面における反射波の振幅です。また、 k_0 は複素波数で、 $k_0 = k_0' - jk_0''$ と表せます。 k_0' の実数部は実際の波数、虚数部は管の長手方向の減衰定数を表します。

管内の音場は、入射波と反射波の和で表せます。マイクロホン 1 の場所での音圧 p_1 、マイクロホン 2 の場所での音圧 p_2 はそれぞれ次式のように表せます。

$$p_1 = \hat{p}_I e^{jk_0 x_1} + \hat{p}_R e^{-jk_0 x_1} \quad (\text{A1-3})$$

$$p_2 = \hat{p}_I e^{jk_0 x_2} + \hat{p}_R e^{-jk_0 x_2} \quad (\text{A1-4})$$

ここで、入射波のみが存在する場合のマイクロホン 1、マイクロホン 2 間の伝達関数は、

$$H_I = \frac{p_{2,I}}{p_{1,I}} = e^{-jk_0(x_1-x_2)} = e^{-jk_0 s} \quad (\text{A1-5})$$

ただし $s = x_1 - x_2$ であり、 s は二つのマイクロホン間の距離を表します。

同様に反射波のみが存在する場合のマイクロホン 1、マイクロホン 2 間の伝達関数は、

$$H_R = \frac{p_{2,R}}{p_{1,R}} = e^{jk_0(x_1-x_2)} = e^{jk_0 s} \quad (\text{A1-6})$$

そして、マイクロホン 2 点間の伝達関数は次式のように表せます。

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{\hat{p}_I e^{jk_0 x_2} + \hat{p}_R e^{-jk_0 x_2}}{\hat{p}_I e^{jk_0 x_1} + \hat{p}_R e^{-jk_0 x_1}} = \frac{e^{jk_0 x_2} + r e^{-jk_0 x_2}}{e^{jk_0 x_1} + r e^{-jk_0 x_1}} \quad (\text{A1-7})$$

ただし, $r = \hat{p}_R / \hat{p}_I$ は, 試料表面における複素音圧反射率を表します. 上式を r について解き, 整理すると,

$$r = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0 x_1} = r_r + jr_i \quad (\text{A1-8})$$

(A1-8)から, 管内での二つのマイクロホン間の伝達関数から複素音圧反射率を求めることができます.

A1-2 音圧反射率と他のパラメータとの関係

A1-2-1 垂直入射吸音率

垂直入射吸音率は、複素音圧反射率から次のように算出できます。

$$\alpha = 1 - |r|^2 = 1 - r_r^2 - r_i^2 \quad (\text{A1-9})$$

A1-2-2 比音響インピーダンス比

比音響インピーダンス比は、自由音場を平面波が伝搬するときの比音響インピーダンスで基準化した試料表面における比音響インピーダンスで、次式のように算出できます。

材料表面における音圧は、(A1-3)より、

$$p_0 = \hat{p}_I e^{jk_0 0} + \hat{p}_R e^{-jk_0 0} = \hat{p}_I + \hat{p}_R \quad (\text{A1-10})$$

材料表面における粒子速度は、

$$u_0 = \frac{1}{j\omega\rho} \cdot \left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{1}{\rho c_0} (\hat{p}_I - \hat{p}_R) \quad (\text{A1-11})$$

従って、

$$z = Z/\rho c_0 = R/\rho c_0 + jX/\rho c_0 = z' + jz'' = \frac{1}{\rho c_0} \frac{p_0}{u_0} = \frac{1+r}{1-r} \quad (\text{A1-12})$$

A1-2-3 ランダム入射吸音率

本測定で得られた比音響インピーダンス比の測定結果から、試料の局所作用を仮定したランダム入射吸音率を次のように算出することができます。

$$\alpha_{st} = 8 \frac{z'}{z'^2 + z''^2} \left[1 - \frac{z'}{z'^2 + z''^2} \cdot \ln(1 + 2z' + z'^2 + z''^2) + \frac{1}{z''} \cdot \frac{z'^2 - z''^2}{z'^2 + z''^2} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{z''}{1 + z'} \right) \right]$$

(A1-13)

A1-3 特性インピーダンスと伝搬定数

A1-3-1 導出

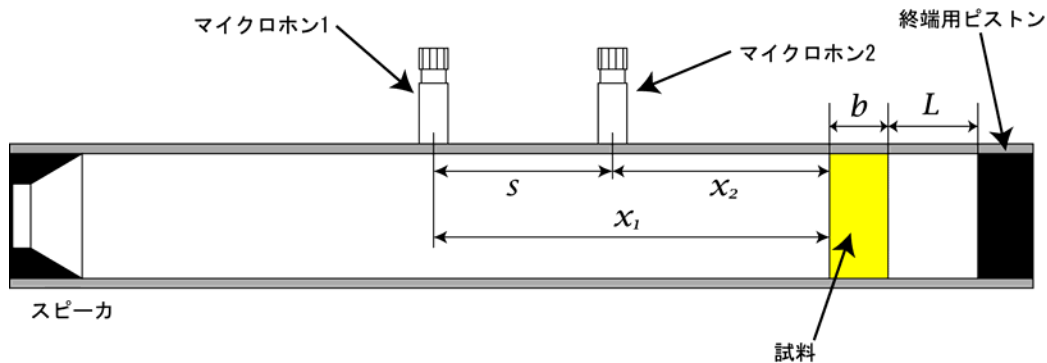


図 A1-2 背後空気層がある場合の管内音場のモデル

特性インピーダンスは、媒質が無限に続くとは定したときの、試料内部での音響インピーダンスと定義されます。媒質が空気の場合の ρc_0 に相当するものと考えることが出来ます。伝搬定数は、特性インピーダンスから計算でき、媒質内での音波の伝搬と減衰を表すパラメータです。これらのパラメータは、試料の背後空気層を変えて二回の測定を行うことにより算出できます。

Zwicker によれば、等方性を持つ多孔質材料の場合、試料表面の比音響インピーダンス Z は、試料の特性インピーダンスを Z_c 、試料内の伝搬定数を γ 、試料背後から管端を見た比音響インピーダンスを Z_1 、試料の厚さを b 、背後空気層を L とすると次式のように表せます。

$$Z = Z_c \frac{Z_1 \cosh(\gamma b) + Z_c \sinh(\gamma b)}{Z_1 \sinh(\gamma b) + Z_c \cosh(\gamma b)} \quad (\text{A1-14})$$

上式を変形すると、

$$\frac{Z + Z_c}{Z - Z_c} \cdot \frac{Z_1 - Z_c}{Z_1 + Z_c} = e^{2\gamma b} \quad (\text{A1-15})$$

(A1-15)の右辺は、 b と γ の関数で、 b は定数です。従って、背後空気層を L に変化させても右辺の値は変化しません。したがって、背後空気層を L としたときの試料表面の比音響インピーダンスを Z' 、試料背後から管端を見たときの比音響インピーダンスを Z_1' とすれば、次式が成立します。

$$\frac{Z + Z_c}{Z - Z_c} \cdot \frac{Z_1 - Z_c}{Z_1 + Z_c} = \frac{Z' + Z_c}{Z' - Z_c} \cdot \frac{Z_1' - Z_c}{Z_1' + Z_c} \quad (\text{A1-16})$$

(A1-15),(A1-16)を連立して解くと、

$$Z_c = \pm \sqrt{\frac{ZZ'(Z_1 - Z_1') - Z_1 Z_1'(Z_0 - Z_0')}{(Z_1 - Z_1') - (Z_0 - Z_0')}} \quad (\text{A1-17})$$

$$\gamma = \frac{1}{2b} \cdot \ln \left(\frac{Z + Z_c}{Z - Z_c} \cdot \frac{Z_1 - Z_c}{Z_1 + Z_c} \right) \quad (\text{A1-18})$$

ただし、(A1-17)の符号は、実数部が正になるように決定します。また、 Z_1 、 Z_1' は、剛な管端を見たときのインピーダンスを利用して、次のように置くことができます。

$$Z_1 = -j\rho c_0 \cdot \cot(k_0 L) \quad (\text{A1-19})$$

$$Z_1' = -j\rho c_0 \cdot \cot(k_0 L') \quad (\text{A1-20})$$

伝搬定数の実数部は、試料内を音波が進行する際の減衰定数と見なすことができます。音波は、試料内を進行するにあたり、伝搬距離を x とすると、 $\exp(-\text{Re}[\gamma] \cdot x)$ の関係で減衰すると考えられます。

また、伝搬定数の虚数部は、試料内を音波が進行する際の波数と見なすことができます。試料内での音速は $\text{Im}[\gamma] = \omega/c_M$ の関係から求めることができます。これらのパラメータは、吸音メカニズムの更なる解析に有用になります。本システムでは、特性インピーダンスを表示する際には、空気特性インピーダンス ρc_0 で基準化して表示します。

A1-3-2 特性インピーダンス、伝搬定数測定の際の注意点

詳しくは、Utsumo (参考文献[2])に譲りますが、測定の際には次の点に注意する必要があります。

A) 二つの背後空気層の選び方

(A1-15)について、もし、 Z_1 が Z_1' に数値的に近づくとき、特性インピーダンス Z_c は $\pm Z_1$ に漸近します。すなわちこの場合、試料の特性インピーダンスは、閉管の音響インピーダンスに漸近することになります。これは、測定された音響インピーダンスに絡む項 $(Z - Z')$ が他の項に対して無視できるほど小さくなるために起こります。この現象は、次の条件のときに起こります。

$$f(L - L') = nc_0/2 \quad (\text{A1-21})$$

実際の測定では、測定したい周波数の範囲で上記の条件を満たすことがないように背後空気層の選び型を検討する必要があります。

B) 伝搬定数の算出について

伝搬定数を算出する(A1-16)は、一価の関数ではありません。なぜならば、複素数を引数として取る対数関数は、次の関係があるためです。

$$\ln(z) = \ln|z| + j(\arg(z) + 2n\pi) \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (\text{A1-22})$$

つまり、無限個の値が(A1-16)を満たします。本システムでは(A1-22)を用い、関数の連続性を考慮した計算結果の導出をしています。

A1-3-3 垂直入射透過損失の算出

特性インピーダンスと伝搬定数を用いて、垂直入射透過損失を算出します。

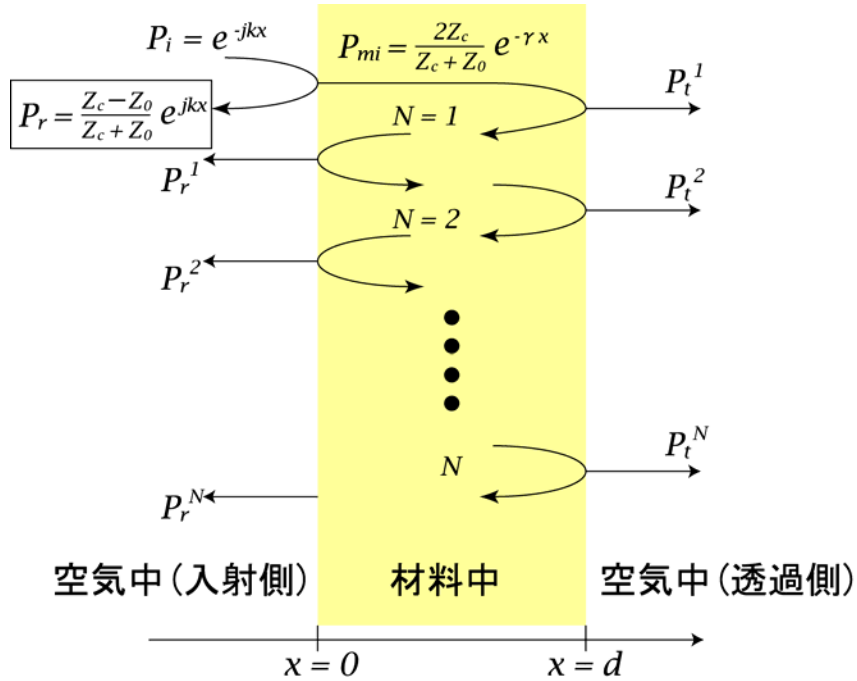


図 A1-3 透過波が多重反射する模式図

図 A1-3 で示したように、試料厚 d の試料表面に入射した平面波音圧 P_i は、試料中で多重反射を繰り返し、そのうちに減衰し消散します。入射波が試料表面で反射する音波の音圧 P_r と試料中に透過する音波の音圧 P_{mi} に分かれる時、それぞれは以下のように表すことができます。

$$P_i = e^{-jkx} \quad (\text{A1-23a})$$

$$P_r = \frac{Z_c - Z_0}{Z_c + Z_0} e^{jkx} \quad (\text{A1-23b})$$

$$P_{mi} = \frac{2Z_c}{Z_c + Z_0} e^{-\gamma x} \quad (\text{A1-23c})$$

ここで、 Z_0 は空气中的音響インピーダンス、 Z_c は試料の特性インピーダンス、 γ は試料の伝搬定数です。

試料裏面で反射した回数を N とすると、多重反射を繰り返すうちに、入射側と透過側に透過します。試料表面から入射側に透過する透過音圧を P_r^N 、試料裏面から透過側に透過する透過音圧 P_t^N とした時、それぞれは以下のように表せます。

試料表面から入射側に透過する透過音圧

$$P_r^1 = \frac{2Z_0}{Z_0 + Z_c} \cdot \frac{2Z_c}{Z_0 + Z_c} \cdot \frac{Z_0 - Z_c}{Z_0 + Z_c} \cdot e^{-2\gamma d} \cdot e^{jkx}$$

$$P_r^2 = \frac{2Z_0}{Z_0 + Z_c} \cdot \frac{2Z_c}{Z_0 + Z_c} \cdot \left(\frac{Z_0 - Z_c}{Z_0 + Z_c} \right)^3 \cdot e^{-4\gamma d} \cdot e^{jkx}$$

\vdots
 \vdots
 \vdots

$$P_r^N = \frac{2Z_0}{Z_0 + Z_c} \cdot \frac{2Z_c}{Z_0 + Z_c} \cdot \left(\frac{Z_0 - Z_c}{Z_0 + Z_c} \right)^{2N-1} \cdot e^{-2N\gamma d} \cdot e^{jkx} \quad (\text{A1-24a})$$

試料裏面から透過側に透過する透過音圧

$$P_t^1 = \frac{2Z_0}{Z_0 + Z_c} \cdot \frac{2Z_c}{Z_0 + Z_c} \cdot e^{-\gamma d} \cdot e^{-jk(x-d)}$$

$$P_t^2 = \frac{2Z_0}{Z_0 + Z_c} \cdot \frac{2Z_c}{Z_0 + Z_c} \cdot \left(\frac{Z_0 - Z_c}{Z_0 + Z_c} \right)^2 \cdot e^{-3\gamma d} \cdot e^{-jk(x-d)}$$

⋮

$$P_t^N = \frac{2Z_0}{Z_0 + Z_c} \cdot \frac{2Z_c}{Z_0 + Z_c} \cdot \left(\frac{Z_0 - Z_c}{Z_0 + Z_c} \right)^{2N-2} \cdot e^{-(2N-1)\gamma d} \cdot e^{-jk(x-d)} \quad (\text{A1-24b})$$

(A1-24b)より, 透過係数 $T = \left(\sum P_t^N \right) / P_i$ と表すことができるので, 透過損失 TL は以下のように求めることができます.

$$TL = 10 \log \left(\frac{1}{\left| \left(\sum P_t^N \right) / P_i \right|^2} \right) \quad (\text{A1-25})$$

本システムでは多重反射を三次 ($N = 3$) まで考慮して, 垂直入射透過損失を算出しています.

A1-4 測定可能な周波数範囲と周波数分析のパラメータ

この測定手法で測定可能な周波数範囲は、音響管のサイズと形状、それに周波数分析器の精度によります。本システムでは、サウンドカードを利用して入出力を行うことから、サンプリング周波数の設定はサウンドカードによります。したがって周波数分解能の観点からも、適切なサンプリング周波数、分解能を選ぶことが測定データの信頼性を向上させるために重要です。

まず、測定可能な上限周波数は、音響管の断面のサイズと形状によって決まります。これは、周波数が高くなると、音響管内に一次元音場（平面波音場）を形成できなくなるからです。断面形状が円の場合（円筒管の場合）、測定可能な周波数の上限は、次式で与えられます。

$$f_u < \frac{0.58 \cdot c_0}{d} \quad (\text{A1-26})$$

ここに、 d は管の直径です。

断面形状が長方形の場合には、次式で与えられます。

$$f_u < \frac{0.5 \cdot c_0}{d} \quad (\text{A1-27})$$

ここでの d は断面の長辺の長さです。

さらに、マイクロホンの間隔 s は、次の関係を満たすように選ばなければなりません。

$$s < \frac{0.45 \cdot c_0}{f_u} \quad (\text{A1-28})$$

また、周波数分析についてのパラメータは以下のようになっています。

測定時

サンプリング周波数	22050Hz
FFT 点数	8192 ポイント (3200 ライン)
周波数分解能	2.69Hz
窓関数	Hanning
オーバーラップ	70%
平均回数	400 回
ノイズジェネレータ	RANDOM

キャリブレーション時

サンプリング周波数	22050Hz
FFT 点数	8192 ポイント (3200 ライン)
周波数分解能	2.69Hz
窓関数	Rectangular
オーバーラップ	0%
平均回数	50 回
ノイズジェネレータ	PERIODIC RANDOM

A1-5 マイクロホン取付位置の選択基準

本システムでは、詳細な情報を得たい周波数帯域が比較的高周波域の場合（日東紡音響製の 40 音響管であれば 500Hz 以上）、1 チャンネル目のマイクロホンを中央のマイクロホンホルダ、2 チャンネル目のマイクロホンをスピーカから見て最も試料側のマイクロホンホルダに取り付ければ、所定の周波数範囲で安定した測定結果が得られます。

逆に、低域（500Hz 以下）の詳細な吸音特性を知りたい場合には、1 チャンネル目のマイクロホンを最もスピーカ側のマイクロホンホルダに、2 チャンネル目のマイクロホンを最も試料側のマイクロホンホルダに取り付けて測定を行うと安定した測定結果が得られます。ただし、マイクロホンの間隔が広がるため、式（A1-25）による制限のため、高域は 3000Hz 程度までしか測定することが出来ません。

これは、伝達関数を出す際の反射率の算出式（A1-8）の性質を考えるとわかります。マイクロホンの間隔が音波の波長に比べて非常に小さくなる時、式(A1-3)、(A1-4)で表されるマイクロホン 1、マイクロホン 2 での音圧はほとんど同じになります。したがって、この 2 式から算出した伝達関数 H_{12} は、ほとんど 1 になります。従って(A1-8)は、

$$r = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0x_1} \cong \frac{1 - H_I}{H_R - 1} e^{2jk_0x_1} \quad (\text{A1-29})$$

また、 H_I 、 H_R についても、マイクロホンの間隔が音波の波長に比べて非常に小さくなる時には、

$$H_I = e^{-jk_0s} = \cos(k_0s) - j \sin(k_0s) \cong 1 - j0 \quad (\text{A1-30})$$

$$H_R = e^{jk_0s} = \cos(k_0s) + j \sin(k_0s) \cong 1 + j0 \quad (\text{A1-31})$$

と考えられますので、(A1-25)は数値的に大変不安定になり、 H_{12} の微妙な測定誤差が結果に大きな影響を与えます。

従って、低域での測定精度を上げるためには、マイクロホン間隔を広げることが有効です。マイクロホンやマイクロホンアンプ、それに AD 部分や信号処理部分の精度に依存しますが、ISO 10534-2 では、マイクロホンの間隔 s は、測定の下限周波数の波長の 5% よりも大きいことが望ましいとしています。本システムでは、測定機器の精度が高いので、そこまでのマイクロホン間隔を要求しませんが、低域の詳細な吸音特性の検討を行いたい場合には、マイクロホン間隔を広げて測定することをお勧めします。

A1-6 キャリブレーションについて

この測定方法では、二本のマイクロホンを用いて測定を行うため、測定系の違いによる誤差に注意を払う必要があります。ISO10534-2 では、次のいずれかの方法で二つの測定系の差を補正することが求められています。それは、

1. マイクロホンを入れ替えて二回測定し、その相乗平均（幾何平均）を二点間の伝達関数として採用する。
2. 本測定とは別にマイクロホンを入れ替えて二回伝達関数を測定し、補正係数を算出する。本測定では、算出された補正係数を利用して、特性の補正を行う。

本システムでは、本測定時の煩雑さをさけるために、二番目の方法を採用しています。その方法について簡単に説明します。

まず、下図のように本測定と同じようにマイクロホンを取り付け、2チャンネル間の伝達関数を測定します。

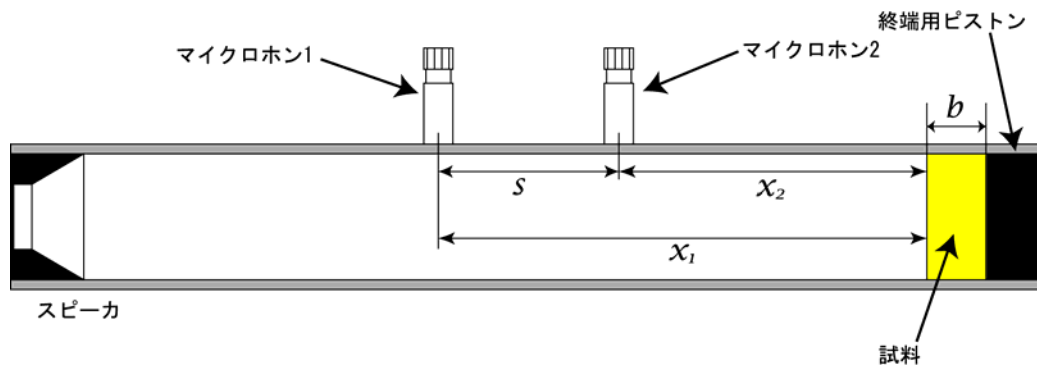


図 A1-4 キャリブレーションノ一回目の伝達関数の測定

この測定により得られた伝達関数を H_{12}^I とします。続いてマイクロホンの取付位置を通常とは逆にして、伝達関数を測定します。入れ替えるのはマイクロホンの位置だけで、他の接続を変更してはいけません。

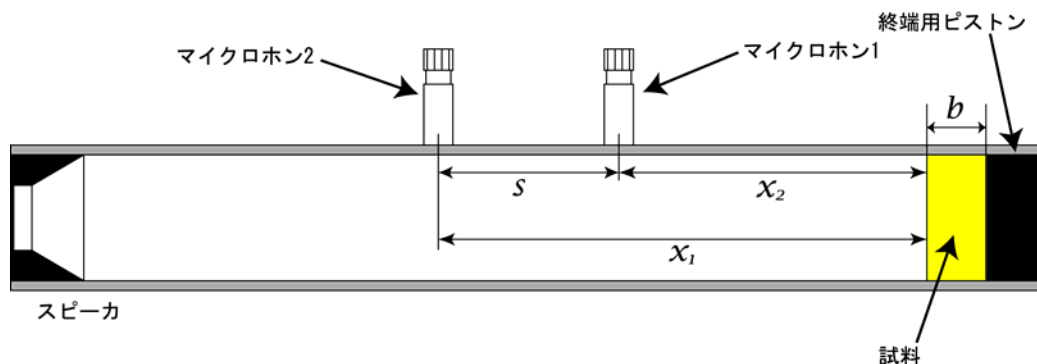


図 A1-5 キャリブレーションノ二回目の伝達関数の測定

この測定により得られた伝達関数を H_{12}^{II} とします。

補正用の伝達関数 H_c は次のように計算されます。

$$H_c = \sqrt{\frac{H'_{12}}{H''_{12}}} = \sqrt{\left| \frac{H'_{12}}{H''_{12}} \right|} \exp\left(j \left[\frac{\arg(H'_{12}) - \arg(H''_{12})}{2} \right] \right) \quad (\text{A1-32})$$

実際の測定の際に、図 A1-3 のマイクロホン配置で測定された 2 チャンネル間の伝達関数を \hat{H}_{12} とすれば、校正された伝達関数は次のように表せます。

$$H_{12} = \frac{\hat{H}_{12}}{H_c} \quad (\text{A1-33})$$

A1-7 伝達マトリクス法

A1-7-1 各測定点におけるマイクロホン音圧

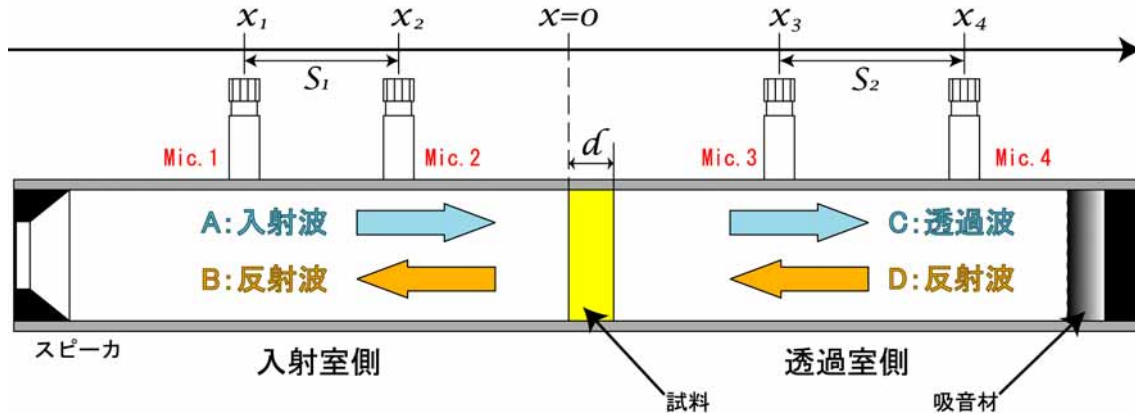


図 A1-6 四端子音響管解析モデル

図 A1-6 に四端子音響管解析モデルを示します。入射室スピーカ側より[マイクロホン 1]，[マイクロホン 2]，[試料]，[マイクロホン 3]，[マイクロホン 4]の順に配置し，終端部分は無反射端を理想とします。

試料に平面波が入射すると，試料表面で反射すると共に一部は試料内部に透過します。音源からランダムノイズを入射すると，左右の管内には定在波が発生します。これは音源から終端部に向かう進行波（A，C）と終端部から音源に向かう後退波（B，D）とが重畳したものです。これらの進行波と後退波を識別するために，各室に二本ずつマイクロホンを設置します。

以下図 A1-4 の通り，入射室側の入射波を A，反射波を B，透過室側の透過波を C，反射波を D とします。また，試料表面（ $x=0$ ）における表面音圧を P_0 ，表面粒子速度を V_0 とし，試料裏面（ $x=d$ ）における裏面音圧を P_d ，裏面粒子速度を V_d とします。

各点における音圧は次のように書けます。

$$[\text{Mic.1}] P_1 = [Ae^{-jkx_1} + Be^{jkx_1}] \cdot e^{j\omega t} \quad (\text{A1-34a})$$

$$[\text{Mic.2}] P_2 = [Ae^{-jkx_2} + Be^{jkx_2}] \cdot e^{j\omega t} \quad (\text{A1-34b})$$

$$[\text{Mic.3}] P_3 = [Ce^{-jkx_3} + De^{jkx_3}] \cdot e^{j\omega t} \quad (\text{A1-34c})$$

$$[\text{Mic.4}] P_4 = [Ce^{-jkx_4} + De^{jkx_4}] \cdot e^{j\omega t} \quad (\text{A1-34d})$$

（ただし，ここで k は媒質（空気）中の波数を表す）

（A1-34）から，進行波（A，C）と後退波（B，D）の振幅を各マイクロホン位置の音圧で表すと，

$$A = j(P_1 e^{jkx_2} - P_2 e^{jkx_1}) / 2 \sin k(x_1 - x_2) \quad (\text{A1-35a})$$

$$B = j(P_2 e^{-jkx_1} - P_1 e^{-jkx_2}) / 2 \sin k(x_1 - x_2) \quad (\text{A1-35b})$$

$$C = j(P_3 e^{jkx_4} - P_4 e^{jkx_3}) / 2 \sin k(x_3 - x_4) \quad (\text{A1-35c})$$

$$D = j(P_4 e^{-jkx_3} - P_3 e^{-jkx_4}) / 2 \sin k(x_3 - x_4) \quad (\text{A1-35d})$$

と、書くことができます。

A1-7-2 垂直入射透過損失の算出式

(A1-35a), (A1-35c) を用いて透過係数 T を伝達関数 H_{12} , H_{13} , H_{34} で表します。

$$\begin{aligned} T &= \frac{C}{A} = \frac{j(P_3 e^{jkx_4} - P_4 e^{jkx_3}) / 2 \sin k(x_3 - x_4)}{j(P_1 e^{jkx_2} - P_2 e^{jkx_1}) / 2 \sin k(x_1 - x_2)} \\ &= \frac{\sin kS_1}{\sin kS_2} \cdot \frac{P_3 e^{jkx_4} - P_4 e^{jkx_3}}{P_1 e^{jkx_2} - P_2 e^{jkx_1}} \\ &= \frac{\sin kS_1}{\sin kS_2} \cdot \frac{e^{jkx_4} - H_{34} e^{jkx_3}}{e^{jkx_2} - H_{12} e^{jkx_1}} \cdot H_{13} \\ &= \frac{\sin kS_1}{\sin kS_2} \cdot \frac{e^{jkS_2} - H_{34}}{e^{jkS_1} - H_{12}} \cdot e^{jk(x_3 - x_1)} H_{13} \end{aligned} \quad (\text{A1-36})$$

(A1-36) の透過係数 T より垂直入射透過損失 TL は次のように表せます。

$$TL = 10 \cdot \log(1/\tau) \quad (\text{ただし, 透過率 } \tau = |T|^2) \quad (\text{A1-37})$$

本システムにおいて, (A1-37) で導出する値を透過損失の実測値として表示しています。

A1-7-3 試料表面，及び試料裏面における音圧と粒子速度

試料表面，及び裏面における音圧と粒子速度を，各マイクロホン音圧で表すと，

$$[\text{表面音圧}] \quad P_0 = A + B$$

$$= \frac{j \{ P_1 (e^{jkx_2} - e^{-jkx_2}) - P_2 (e^{jkx_1} - e^{-jkx_1}) \}}{2 \sin k(x_1 - x_2)}$$

$$= \frac{P_1 \sin kx_2 - P_2 \sin kx_1}{\sin kS_1} \quad (\text{A1-38a})$$

$$[\text{表面粒子速度}] \quad V_0 = (A - B) / \rho_0 c_0$$

$$= \frac{j \{ P_1 (e^{jkx_2} + e^{-jkx_2}) - P_2 (e^{jkx_1} + e^{-jkx_1}) \}}{2 \rho_0 c_0 \sin k(x_1 - x_2)}$$

$$= j \frac{P_2 \cos kx_1 - P_1 \cos kx_2}{\sin kS_1} \quad (\text{A1-38b})$$

$$[\text{裏面音圧}] \quad P_d = Ce^{-jkd} + De^{jkd}$$

$$= \frac{-j \{ P_3 (e^{jk(x_4-d)} - e^{-jk(x_4-d)}) - P_4 (e^{jk(x_3-d)} - e^{-jk(x_3-d)}) \}}{2 \sin k(x_3 - x_4)}$$

$$= \frac{P_3 \sin k(x_4 - d) - P_4 \sin k(x_3 - d)}{\sin kS_2} \quad (\text{A1-38c})$$

$$[\text{裏面粒子速度}] \quad V_0 = (Ce^{-jkd} - De^{jkd}) / \rho_0 c_0$$

$$= \frac{j \{ P_3 (e^{jk(x_4-d)} + e^{-jk(x_4-d)}) - P_4 (e^{jk(x_3-d)} + e^{-jk(x_3-d)}) \}}{2 \rho_0 c_0 \sin k(x_3 - x_4)}$$

$$= j \frac{P_4 \cos k(x_3 - d) - P_3 \cos k(x_4 - d)}{\rho_0 c_0 \sin kS_2} \quad (\text{A1-38d})$$

(ただし， $\rho_0 c_0$ は空気の音響抵抗。)

A1-7-4 伝達マトリクス表現

図 A1-4 のモデルにおける入射波の振る舞いを伝達マトリクスで表すと、以下のようになります。

$$\begin{pmatrix} P_0 \\ V_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_d \\ V_d \end{pmatrix} \quad (\text{A1-39})$$

(A1-39) の伝達マトリクスの四要素を決定するためには、更にあと二つの条件式が必要です。それらの条件式を導き出すには以下の二種類の方法があります。

二種の負荷条件から求める方法

透過室側の終端条件を開放 (Open), 吸音終端 (Close) の二条件を用います。

A) 開放条件 (Open)

$$\begin{pmatrix} P_{0O} \\ V_{0O} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_{dO} \\ V_{dO} \end{pmatrix} \quad (\text{A1-40a})$$

B) 吸音終端条件 (Close)

$$\begin{pmatrix} P_{0C} \\ V_{0C} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_{dC} \\ V_{dC} \end{pmatrix} \quad (\text{A1-40b})$$

以上二条件から伝達マトリクスの要素を確定すると、以下のようになります。

$$T_{11} = \frac{P_{0O} \cdot V_{dC} - P_{0C} \cdot V_{dO}}{P_{dO} \cdot V_{dC} - P_{dC} \cdot V_{dO}} \quad (\text{A1-41a})$$

$$T_{12} = \frac{P_{0C} \cdot P_{dO} - P_{0O} \cdot P_{dC}}{P_{dO} \cdot V_{dC} - P_{dC} \cdot V_{dO}} \quad (\text{A1-41b})$$

$$T_{21} = \frac{V_{0O} \cdot V_{dC} - V_{0C} \cdot V_{dO}}{P_{dO} \cdot V_{dC} - P_{dC} \cdot V_{dO}} \quad (\text{A1-41c})$$

$$T_{22} = \frac{P_{dO} \cdot V_{0C} - P_{dC} \cdot V_{0O}}{P_{dO} \cdot V_{dC} - P_{dC} \cdot V_{dO}} \quad (\text{A1-41d})$$

この方法では終端条件一条件につき三回ずつ、二条件で測定するので計六回測定する必要があります。

本システムにおける測定方法「伝達マトリクス」では、この方法により、伝達マトリクスの要素を計算し、各パラメータを導出しています。

伝達マトリクスの相反性から求める方法

測定試料の物理的性質が等方性，均一性を満たす多孔質材料であるならば，以下のような条件式が成り立ちます．

$$\text{[対称性]} \quad T_{11} = T_{22} \quad (\text{A1-42a})$$

$$\text{[相反定理]} \quad T_{11} \cdot T_{22} - T_{12} \cdot T_{21} = 1 \quad (\text{A1-42b})$$

(A1-39) と (A1-42) を用いて伝達マトリクスの要素を求めることができます．この方法で伝達マトリクスの要素を求める際には，いずれの終端条件においても求めることができます．

以下にこの方法で求めた伝達マトリクスの要素を示します．

$$T_{11} = \frac{P_d \cdot V_d + P_0 \cdot V_0}{P_0 \cdot V_d + P_d \cdot V_0} \quad (\text{A1-43a})$$

$$T_{12} = \frac{P_0^2 - P_d^2}{P_0 \cdot V_d + P_d \cdot V_0} \quad (\text{A1-43b})$$

$$T_{21} = \frac{V_0^2 - V_d^2}{P_0 \cdot V_d + P_d \cdot V_0} \quad (\text{A1-43c})$$

$$T_{22} = T_{11} \quad (\text{A1-43d})$$

この方法では終端条件に関わらず一条件，三回の測定で伝達マトリクスの要素を求めることができます．

本システムにおける測定方法「透過損失」では，この方法により，伝達マトリクスの要素を計算し，各パラメータを導出しています．

A1-7-5 伝達マトリクスによる音響特性の算出

材料表面の音響インピーダンス

材料表面の音響インピーダンスは $Z_0 = P_0/V_0$ として求めることができます。

(A1-39) より,

$$Z_0 = \frac{P_0}{V_0} = \frac{T_{11} \cdot P_d + T_{12} \cdot V_d}{T_{21} \cdot P_d + T_{22} \cdot V_d} \quad (\text{A1-44a})$$

以上より試料終端が剛壁密着している条件下では, V_d の項が無視できるので,

$$Z_0 = \frac{P_0}{V_0} = \frac{T_{11}}{T_{21}} \quad (\text{A1-44b})$$

また, 試料終端が開放している条件下では,

$$Z_0 = \frac{P_0}{V_0} = \frac{T_{11} \cdot \frac{P_d}{V_d} + T_{12}}{T_{21} \cdot \frac{P_d}{V_d} + T_{22}} = \frac{\rho_0 c_0 \cdot T_{11} + T_{12}}{\rho_0 c_0 \cdot T_{21} + T_{22}} \quad (\text{A1-44c})$$

本システムで音響インピーダンスを表示する際には, 自由音場を平面波が伝搬するときの比音響インピーダンスで基準化しています。

吸音特性

反射係数 R は, 材料表面における音圧と粒子速度の連続条件から求めることができます。

- ・ 材料表面における音圧

$$P_0 = A + B \quad (\text{A1-45a})$$

- ・ 材料表面における粒子速度

$$V_0 = \frac{P_0}{Z_0} = \frac{A - B}{\rho_0 c_0} \quad (\text{A1-45b})$$

これら 2 式から P_0 を消去し, 反射係数 $R = B/A$ を求めます。 Z_0 は (A1-44c) を用いると,

$$R = \frac{Z_0 - \rho_0 c_0}{Z_0 + \rho_0 c_0} = \frac{\{T_{11} + (T_{12} / \rho_0 c_0)\} - (\rho_0 c_0 \cdot T_{21} + T_{22})}{\{T_{11} + (T_{12} / \rho_0 c_0)\} + (\rho_0 c_0 \cdot T_{21} + T_{22})} \quad (\text{A1-45c})$$

特に, 剛壁密着条件の場合は, (A1-44b) より $Z_0 = T_{11}/T_{21}$ となるので,

$$R = \frac{Z_0 - \rho_0 c_0}{Z_0 + \rho_0 c_0} = \frac{T_{11} - \rho_0 c_0 \cdot T_{21}}{T_{11} + \rho_0 c_0 \cdot T_{21}} \quad (\text{A1-45d})$$

以上より吸音率 α は,

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (\text{A1-45e})$$

として求めることができます。

本システムにおいて透過法測定による吸音率，反射係数の表示は剛壁密着条件を前提として表示していません。

音響透過特性

材料表面の音圧と粒子速度は以下の二式から求めることができます。

$$P_0 = A + B \quad (\text{A1-46a})$$

$$\frac{P_0}{Z_0} = \frac{A - B}{\rho_0 c_0} \quad (\text{A1-46b})$$

以上二式から

$$2A = P_0 \cdot (1 + Z_0) \quad (\text{A1-46c})$$

また，材料裏面の音圧と粒子速度は以下の二式から求めることができます。

$$P_d = Ce^{-jkd} + De^{jkd} \quad (\text{A1-46d})$$

$$P_d = (Ce^{-jkd} - De^{jkd}) / \rho_0 c_0 \quad (\text{A1-46e})$$

以上二式から

$$2Ce^{-jkd} = P_d + \rho_0 c_0 \cdot V_d \quad (\text{A1-46f})$$

ここで (A1-39) を用いて P_d と V_d を P_0 と V_0 で表し，(A1-46f) に代入すると，

$$2Ce^{-jkd} = \frac{(T_{12}V_0 - T_{22}P_0) + \rho_0 c_0 (T_{21}P_0 - T_{11}V_0)}{T_{12}T_{21} - T_{11}T_{22}} \quad (\text{A1-46g})$$

(A1-46c) と (A1-46g) から透過係数 $T = C/A$ を算出すると，

$$\begin{aligned} T = \frac{C}{A} &= 2e^{jkd} \frac{T_{12} - T_{22}(P_0/V_0) + \rho_0 c_0 \{T_{21}(P_0/V_0) - T_{11}\}}{2\{(P_0/V_0) + \rho_0 c_0\} \cdot (T_{12}T_{21} - T_{11}T_{22})} \\ &= \frac{2e^{jkd}}{T_{11} + (T_{12}/\rho_0 c_0) + \rho_0 c_0 \cdot T_{21} + T_{22}} \end{aligned} \quad (\text{A1-46h})$$

(ただし， $Z_0 = P_0/V_0$ として (A1-41c) を代入)

以上より透過損失は，

$$TL = 10 \cdot \log(1/\tau) \quad (\text{ただし，透過率 } \tau = |T|^2) \quad (\text{A1-46i})$$

特性インピーダンス

垂直入射における，有限な長さをもつ，均一な等方性多孔質材の伝達マトリクス $|T_m|$ は以下のように表すことができます．

$$|T_m| = \begin{vmatrix} \cosh(\gamma d) & Z_c \sinh(\gamma d) \\ \sinh(\gamma d)/Z_c & \cosh(\gamma d) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos(k_m d) & jZ_c \sin(k_m d) \\ j \sin(k_m d)/Z_c & \cos(k_m d) \end{vmatrix} \quad (\text{A1-47})$$

Z_c : 試料の特性インピーダンス(Pa・s / m)

γ : 伝搬定数 ($= \alpha + j\beta$) , α : 減衰定数(neper / m) , β : 位相定数(rad / m)

d : 試料厚(m)

(k_m は伝搬定数の波数表現 $\gamma = jk_m$ より得られる)

(A1-47) の関係を用いて，

$$\frac{T_{12}}{T_{21}} = \frac{Z_c \sinh(\gamma d)}{\sinh(\gamma d)/Z_c} = Z_c^2$$

$$Z_c = \pm \sqrt{T_{12}/T_{21}} \quad (\text{このとき，正の値を選択}) \quad (\text{A1-48})$$

本システムでは，特性インピーダンスを表示する際には空気特性インピーダンスで基準化しています．

伝搬定数

伝搬定数の算出方法は以下の三通りあります．

1) (A1-47) より， $T_{11} = \cosh(\gamma d)$ の関係を用いると，

$$\gamma = \frac{\cosh^{-1}(T_{11})}{d} = \frac{j \cos^{-1}(T_{11})}{d} \quad (\text{A1-49a})$$

2) (A1-47) より， $T_{12} \cdot T_{21} = \sinh^2(\gamma d)$ の関係を用いると，

$$\gamma = \frac{\sinh^{-1} \sqrt{T_{12} \cdot T_{21}}}{d} = \frac{\sin^{-1} \sqrt{-T_{12} \cdot T_{21}}}{d} \quad (\text{A1-49b})$$

3) (A1-44b) , (A1-47) より，試料表面の音響インピーダンスは以下のように表現できます．

$$Z_0 = \frac{T_{11}}{T_{21}} = \frac{\cosh(\gamma d)}{\sinh(\gamma d)/Z_c} = Z_c \coth(\gamma d) \quad (\text{A1-49c})$$

上記式より , $\tanh(\gamma d) = Z_c/Z_0$ となるので ,

$$\gamma = \frac{\tanh^{-1}(Z_c/Z_0)}{d} = \frac{1}{2d} \ln \left(\frac{1+Z_c/Z_0}{1-Z_c/Z_0} \right) \quad (\text{A1-49d})$$

A1-8 体積弾性率と有効密度

A1-8-1 体積弾性率

体積弾性率 K は以下の式で定義されています。

$$K = \rho \cdot c^2 \quad (\text{A1-50})$$

ただし, ρ は試料の有効密度, c は試料の有効速度です。

多孔度(ポロシティ) ϕ を用いて多孔質材の特性インピーダンス Z_c を表現すると, 以下のようになります。

$$Z_c = \frac{\rho \cdot c}{\phi} \quad (\text{A1-51})$$

また ω を角周波数とし, 波数 ($k = \omega/c$) を用いて伝搬定数 γ は以下のように表されます。

$$\gamma = jk = j \frac{\omega}{c} \quad (\text{A1-52})$$

以上より, (A1-51) と (A1-52) を (A1-50) に代入すると,

$$K = j\omega \frac{\phi \cdot Z_c}{\gamma} \quad (\text{A1-53})$$

となります。

ここで多孔度(ポロシティ) ϕ は, ほとんどの多孔質材においては $\phi \approx 1$ とみなせるため, 本システムでは以下の式より体積弾性率を算出しています。

$$K = j\omega \frac{Z_c}{\gamma} \quad (\text{A1-54})$$

A1-8-2 有効密度

(A1-51) と (A1-52) を用いて有効密度 ρ を求めると, 以下のようになります。

$$\rho = -j \frac{\phi}{\omega} Z_c \cdot \gamma \quad (\text{A1-55})$$

参考文献

- [1]ISO 10534-2 “ Acoustics · Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes · , Part2: Transfer-function method ” .
- [2]Hideo Utsuno et., al., “ Transfer function method for measuring characteristic impedance and propagation constant of porous materials ”, Journal Acoustic Society of America, No. 86, vol. 2, 1989.
- [3]C. Zwicker and C. Kosten, “ Sound Absorbing Materials ”, Elsevier, New York, 1949.
- [4]Bryan H. Song and J. Stuart Bolton, “ A transfer-matrix approach for estimating the characteristic impedance and wave numbers of limp and rigid porous materials ”, Journal Acoustic Society of America, No 3, vol. 107, 2000.
- [5]Jean-F. Allard, “ New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials ”, Journal Acoustic Society of America, No. 6, vol. 91, 1992.
- [6]山口 道征, 中川 博, “ 各種多孔質材料の音響特性 ~ (第 28 報) 多孔質材料の透過損失 ~ ”, 日本音響学会講演論文集, 2002 年 9 月 .

更新履歴

2003/12/02	Rev.1.1	仕様に NAE40 音響管反映 の説明部分を修正(Re[]:減衰定数, Im[]:波数)
2004/01/13	Rev.1.2	伝搬定数の算出式の修正(jを省く)
2005/06/30	Rev.2.0	WinzacMTX に対応
2005/08/16	Rev.2.01	文章一部修正
2005/09/29	Rev.2.02	音響管の写真を更新
2005/11/14	Rev.2.03	低周波対応オプション管により 100Hz ~ の測定可能と記載
2006/02/24	Rev.2.5	透過の理論を追加。(マニュアルよりコピー)