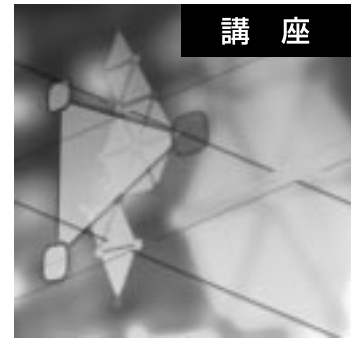


Excel による音響解析入門

— 音響構造特性の解析 — (4)

Excel によるダクト系消音器の解析



笹尾 博行 (株)大気社研究開発センター 正会員

キーワード : 音響解析(Acoustic Analysis), リアクティブ消音器(Reactive Silencer), 内張ダクト(Lining Duct), 平面波(Plane Wave), 表計算ソフト(Spreadsheet Software)

はじめに

本講座の最終回の今回は、ダクト系消音器を取り挙げる。消音器を大別すると、音波の干渉を利用したリアクティブ消音器と、吸音材により音響エネルギーの吸収を図る吸収型消音器がある。

リアクティブ消音器の解析には平面波音場解析が有効で、基本的な型式の消音器については比較的容易に音響減衰量である透過損失を求めることができる^{1)~4)}。一方、吸収型消音器の中で最も基本的な型式である内張ダクトについては、矩形の無限長内張ダクトの理論式に基づく解法⁵⁾が知られており、透過損失の解析値¹⁾⁶⁾を得ることができる。

今回はこれらダクト系消音器について解析法を解説し、さらに表計算ソフト(Excel)による解析方法と解析例を紹介する。

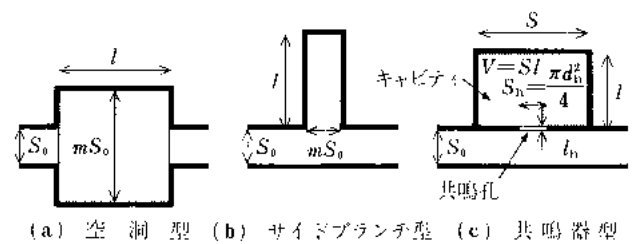


図-1 リアクティブ消音器

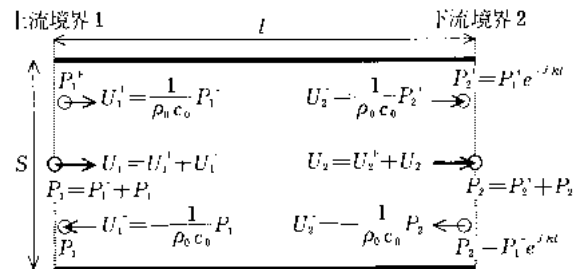


図-2 音響管

1. ダクト系消音器の解析法

1.1 リアクティブ消音器の構成

基本的なリアクティブ消音器には、図-1 に示す空洞型、サイドブランチ型、共鳴器型がある。図-1 で色づけした部分が消音器として機能する音響構造で、図-2 に示す音響管を基本として構成される。ここで、音響管については本講座の第1回に詳細を述べたので、詳しくはこれを参照されたい。

図-2 に示した音響管の上流境界1と下流境界2の音圧 P_1, P_2 と体積速度 SU_1, SU_2 の関係は式(1)で伝達マトリックスで与えられる。

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ SU_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos kl & j \frac{\rho_0 c_0}{S} \sin kl \\ j \frac{S}{\rho_0 c_0} \sin kl & \cos kl \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_2 \\ SU_2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 S と l は音響管の断面積と長さ、 ρ_0 と c_0 は空気密度と音速、 k は波長定数 ($k = \omega / c_0 = 2\pi f / c_0$)、 ω は角周波数、 f は周波数、 U は粒子速度である。

図-1 の(a)に示した空洞型消音器の構造は図-2 に示した音響管をそのものであり、その音響特性は式(1)に示す四端子定数 t で与えられる。

$$\begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos kl & j \frac{\rho_0 c_0}{mS_0} \sin kl \\ j \frac{mS_0}{\rho_0 c_0} \sin kl & \cos kl \end{bmatrix} \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 mS_0 と l は空洞の断面積と長さ、 S_0 はダクトの断面積、 m はダクト断面積に対する空洞断面積の拡大比である。

図-1 の(b)に示したサイドブランチ型消音器の構造は図-2 の音響管の下流境界2を閉じたものである。この場合、下流境界の粒子速度 U_2 は $U_2 = 0$ となるので、上流境界における音響インピーダンスは式(3)で与えられる。

$$Z = \frac{P_2}{SU_2} = \frac{P_2 \cos kl}{jP_2 \frac{S}{\rho_0 c_0} \sin kl} = -j \frac{\rho_0 c_0}{S \tan kl} \quad \dots\dots(3)$$

注 Microsoft, MS, Windows, Visual Basic は、米国 Microsoft Corporation の米国およびその他の国における登録商標です。その他、本書に掲載されている会社名、製品名は、一般に各社の登録商標または商標です。

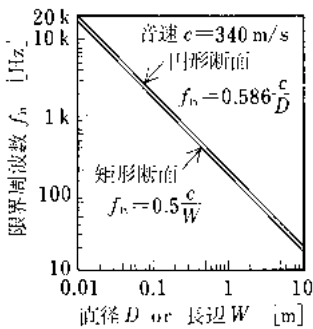


図-3 平面波音場の条件

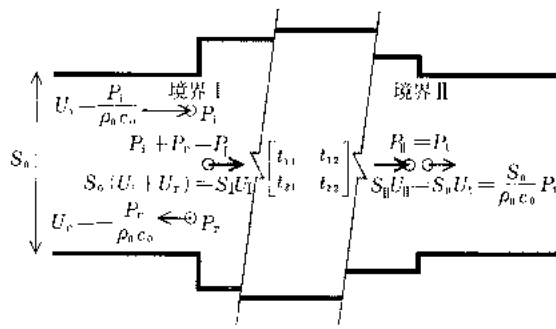


図-4 消音器のシリーズ接続

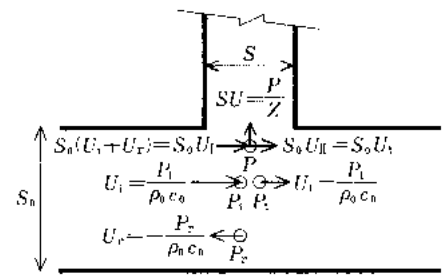


図-5 消音器のサイドブランチ接続

式(3)で $S = mS_0$ とすると、図-1の(b)に示したサイドブランチ型消音器のインピーダンスが得られる。

図-1の(c)に示した共鳴器型消音器はキャビティ(断面積 S 、長さ l 、容積 $V = Sl$)と共鳴孔(断面積 S_n 、長さ h)から構成される。キャビティは下流境界を閉じた音響管であるので、音響特性は式(3)の音響インピーダンスで与えられる。ここで、キャビティの長さ l が対象とする騒音の波長 $\lambda = 2\pi/k$ に対し十分小さい場合(すなわち $kl = 2\pi l/k \ll 1$)には、式(4)となる。

$$Z_c = -j \frac{\rho_0 c_0}{S \tan kl} \cong -j \frac{\rho_0 c_0^2}{\omega V} \quad \dots\dots(4)$$

一方、共鳴孔は断面積 S_n 、長さ h の音響管であるが、共鳴孔の長さ h は波長に対し十分小さく、共鳴孔内の空気は一体として動くと考えられることから、共鳴孔の音響インピーダンスは式(5)で与えられる。

$$Z_h = R + j\omega\rho_0 \frac{h + (\delta_1 + \delta_2)d_h}{S_n} \quad \dots\dots(5)$$

ここで、 R は共鳴孔の内部壁での粘性と熱伝導による音響エネルギー消費に基づく音響抵抗、 δ は共鳴孔の両端での音響放射による共鳴孔長の補正係数、 d_h は共鳴孔の直径である。式(5)は本講座の第2回の1.3節に示した有孔板の孔の扱いと同じであり、詳細はこれを参照されたい。

共鳴器型消音器のキャビティと共鳴孔の音響インピーダンスが式(4)、(5)で与えられると、式(6)に示すとおり共鳴器全体の音響インピーダンスが得られる。

$$\begin{aligned} Z &= Z_c + Z_h \\ &= R + j\rho_0 \left(\omega \frac{h + (\delta_1 + \delta_2)d_h}{S_n} - \frac{c_0^2}{\omega V} \right) \quad \dots\dots(6) \end{aligned}$$

なお、リアクティブ消音器では音波の干渉を利用するので、消音器として機能するのは図-3に示す平面波音場に限られる。図-1の例では、ダクト断面とリアクティブ消音器を構成する音響要素の断面により、限界周波数が規定される。

1.2 リアクティブ消音器の透過損失

リアクティブ消音器とダクトの接続関係には、図-4に

示すシリーズ接続と図-5に示すサイドブランチ接続がある。図-1の(a)に示した空洞型はシリーズ接続、(b)に示したサイドブランチ型と(c)に示した共鳴器型はサイドブランチ接続である。

図-4のシリーズ接続では、一般に消音器の音響特性は四端子定数 t で与えられ、消音器の上流の境界 I と下流の境界 II の音圧 P_i, P_{ii} と体積速度 $S_i U_i, S_{ii} U_{ii}$ の関係は式(7)で与えられる。

$$\begin{bmatrix} P_i \\ S_i U_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ii} \\ S_{ii} U_{ii} \end{bmatrix} \quad \dots\dots(7)$$

一方、境界 I の音圧平衡と体積速度収支は式(8)、(9)で与えられ、境界 II については式(10)、(11)で与えられる。

$$P_i = P_i + P_r \quad \dots\dots(8)$$

$$S_i U_i = S(U_i + U_r) = \frac{S_0}{\rho_0 c_0} (P_i - P_r) \quad \dots\dots(9)$$

$$P_{ii} = P_i \quad \dots\dots(10)$$

$$S_{ii} U_{ii} = S_0 U_i = \frac{S_0}{\rho_0 c_0} P_i \quad \dots\dots(11)$$

ただし、 P_i と U_i は入射音、 P_r と U_r は反射音、 P_i と U_i は透過音の音圧と粒子速度である。ここで、一般に消音器の音響減衰量は下流側の反射がない無反射接続時の透過損失で定義されるので、境界 II の下流では反射音がない条件とした。

式(8)~(11)の関係を式(7)に適用すると、式(12)に示す透過損失 T_L が得られる。

$$\begin{aligned} T_L &= 10 \log \left| \frac{P_i}{P_r} \right|^2 \\ &= 10 \log \frac{\left| t_{11} + \frac{S_0}{\rho_0 c_0} t_{12} + \frac{\rho_0 c_0}{S_0} t_{21} + t_{22} \right|^2}{4} \quad \dots\dots(12) \end{aligned}$$

図-5に示したサイドブランチ接続では、一般に消音器の音響特性は音響インピーダンス Z で与えられ、上流側体積速度 $S_0 U_i$ と下流側体積速度 $S_0 U_{ii}$ および消音器側体積速度 $SU (= P/Z)$ の間には式(13)の収支が成り立つ。

$$S_0 U_i = S_0 U_{ii} + SU \quad \dots\dots(13)$$

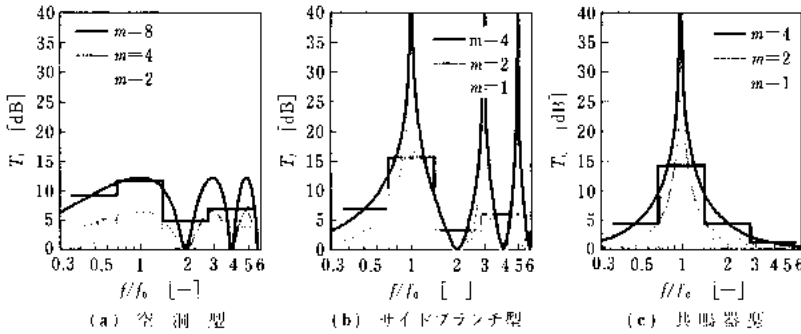


図-6 リアクティブ消音器の透過損失

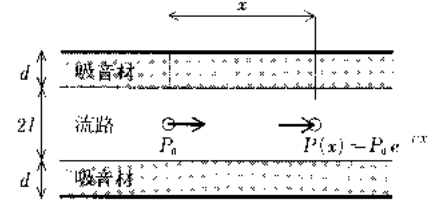


図-7 無限長内張ダクトのモデル

また、上流側音圧 $P_I (= P_1 + P_r)$ と下流側音圧 $P_{II} (= P_t)$ は式(14)のとおり等しい。

$$P_I = P_{II} \quad \dots\dots(14)$$

式(13)と式(14)の関係から、消音器の上流側 I と下流側 II の音圧 P_I, P_{II} と体積速度 $S_I U_I, S_{II} U_{II}$ の関係は式(15)で与えられる。

$$\begin{bmatrix} P_I \\ S_I U_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{II} \\ S_{II} U_{II} \end{bmatrix} \quad \dots\dots(15)$$

ここで、式(15)は式(7)と同型式の伝達マトリックスであり、式(15)の四端子定数 ($t_{11}=1, t_{12}=0, t_{21}=1/Z, t_{22}=1$) を式(12)に適用すると、式(16)に示す透過損失が得られる。

$$T_L = 10 \log \left| 1 + \frac{\rho_0 c_0}{2 S_0} Z \right|^2 \quad \dots\dots(16)$$

1.3 リアクティブ消音器の透過損失の周波数特性

ここでは1.1節と1.2節に示した関係式から、各リアクティブ消音器の透過損失の具体的な式を明示し、周波数特性を示す。

式(2)を式(12)に適用すると、式(15)に示す空洞型消音器の透過損失が得られる。

$$T_L = 10 \log \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left(m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 \frac{\pi f}{2 f_0} \right\} \quad \dots\dots(17)$$

$$f_0 = \frac{c_0}{4l} \quad \dots\dots(18)$$

ここで、 f_0 は透過損失が極大となる最も低次の周波数で、空洞の長さ l に規定される。また、 m は空洞の断面積の拡大比で、透過損失の最大値を規定する。

式(3)を式(16)に適用すると、式(19)に示すサイドブランチ型消音器の透過損失が得られる。

$$T_L = 10 \log \left(1 + \frac{m^2}{4} \tan^2 \frac{\pi f}{2 f_0} \right) \quad \dots\dots(19)$$

$$f_0 = \frac{c_0}{4l} \quad \dots\dots(20)$$

ここで、 f_0 は透過損失が無窮大となる最も低次の周波数で、サイドブランチの長さ l に規定される。また、 m はダクト断面積に対するサイドブランチの断面積比で、透過

損失の周波数特性の広さを規定する。

式(6)を式(16)に適用すると、式(21)に示す共振器型消音器の透過損失が得られる。

$$T_L = 10 \log \left[1 + \frac{m^2}{4} \frac{1}{(f/f_0 - f_0/f)^2} \right] \quad \dots\dots(21)$$

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S_0}{\{h + (\delta_1 + \delta_2) d\} V}} \quad \dots\dots(22)$$

$$m = 2\pi \frac{f_0 V}{c_0 S_0} \quad \dots\dots(23)$$

ただし、式(6)の音響抵抗 R は $R=0$ とした。ここで、 f_0 は透過損失が最大となる共振周波数で、共振器の容積と共振孔の形状に規定される。また、 m はダクト断面積と共振周波数で基準化した共振器の容積で、透過損失の周波数特性の広さを規定する。

各消音器の透過損失を図-6に示す。(a)の空洞型と(b)のサイドブランチでは、共振周波数 $f/f_0=1$ 以外の $f/f_0=3, 5$ などでも透過損失の極大が生じるが、一般には平面波音場の条件外となるので、これらの透過損失は生じないことが多い。また、図-6の階段線は1オクターブの平均透過損失で、 m が大きいほど $f/f_0=1$ を中心とする1オクターブ平均透過損失は大きくなるが、平面波音場の条件から m を無条件に大きくすることはできない。

1.4 内張ダクトの解析法

内張ダクトの解析法としては、式(24)に示す矩形の無限長内張ダクトの理論式に基づいた解析法⁵⁾¹⁾⁶⁾が知られている。

$$F(w) = w \tan w + \frac{\rho_0 q}{\rho_0} \tan \frac{qd}{l} = 0 \quad \dots\dots(24)$$

$$p^2 = -(\gamma_0 l)^2 - (kl)^2 \quad \dots\dots(25)$$

$$w^2 = (\Gamma l)^2 + (kl)^2 \quad \dots\dots(26)$$

$$q^2 = w^2 + p^2 \quad \dots\dots(27)$$

ここで、 p と w および q は式(25)~(27)に定義される変数である。また、 d は吸音材の厚さ、 l は流路の半幅、 k は波長定数 ($k=2\pi f/c_0$)、 ρ_0 と c_0 は空気の密度と音速である。 ρ_0 と γ_0 は吸音材の複素密度と伝搬定数で、本講座の第2回の1.2節に示した Delany Bazley の実験式によ

り得ることができる。 Γ は図-7 に示すとおり、流路における伝搬定数で、これが得られると式(28)により透過損失を求めることができる。

$$T_L = 10 \log e^{\Gamma x} = 10 \log e^{\operatorname{Re}(\Gamma x)} \\ = 20 \cdot \log e \cdot \operatorname{Re}(\Gamma) \cdot x \quad \dots\dots(28)$$

ただし、 $\operatorname{Re}(\Gamma)$ は Γ の実部で与えられる減衰定数である。

式(24)を解き、 w を求めると式(26)により Γ が得られる。ここで、式(24)の解法には式(29)に示す Newton Raphson 法を用いる。

$$w_{n+1} = w_n - F(w_n)/F'(w_n) \quad \dots\dots(29)$$

$$F'(w) = \frac{dF(w)}{dw} \\ = \frac{2w + \sin 2w}{1 + \cos 2w} + \frac{\rho_0 w}{\rho_p} \left[\frac{2qd}{l} + \frac{\sin \frac{2qd}{l}}{1 + \cos \frac{2qd}{l}} \right] \quad \dots\dots(30)$$

ただし、 $F'(w_n)$ は式(30)で与えられる式(24)の導関数である。また w_0 は w の初期値で、ごく低い周波数では $w_0 = 0$ 、ごく高い周波数では $w_0 = \pi/2$ とし解を求め、これを初期値とし次の高周波側または低周波側の解を順次求めて行く。

2. Excel によるダクト系消音器の解析

2.1 消音器の解析のためのユーザー関数

前章に示したリアクティブ消音器と内張ダクトの解析法に基づく Excel マクロプログラムのソースコードを文末に示す。ここで、本講座の前回までに示したソースコードは Module 01~08 に分類したが、さらに今回示すソースコードを付け加えることとし、リアクティブ消音器の解析を Module 09、内張ダクトの解析法を Module 10 の関数群に分類した。なお、今回示す関数群では本講座の第 2 回に示した Module 03~06 の関数群を使用するので、これらがないと動作しない。

Module 09 の FuncTLExpansior(f, S_0, m, l) は空洞型消音器の透過損失を算出する関数で、周波数 f [Hz]、接続ダクトの断面積 S [m²]、空洞の拡大比 m [-] と長さ l [m] を与えると、透過損失 T [dB] が得られる。

FuncTLSideBranch(f, S_0, m, l, σ) はサイドブランチ型消音器の透過損失を算出する関数で、周波数 f [Hz]、接続ダクトの断面積 S [m²]、サイドブランチの断面積比 m [-] と長さ l [m] および媒体の流れ抵抗 σ [N·s/m⁴] を与えると、透過損失 T [dB] が得られる。なお、サイドブランチ内の媒体の流れ抵抗 σ は省略可能で、省略すると空洞 ($\sigma = 0$) となる。

FuncTLResonator($f, S_0, N, d_h, h, S_c, l, \sigma$) は共

鳴器型消音器の透過損失を算出する関数で、周波数 f [Hz]、接続ダクトの断面積 S [m²]、共鳴器の数 N 、一つの共鳴器の共鳴孔の直径 d [m] と長さ l [m]、キャビティの断面積 S_c [m²] と長さ l [m] および媒体の流れ抵抗 σ [N·s/m⁴] を与えると、透過損失 T [dB] が得られる。なお、キャビティ内の媒体の流れ抵抗 σ は省略可能で、省略すると空洞 ($\sigma = 0$) となる。

FuncZDuctClose(f, S, l, σ) は式(3)に示した音響管の下流端閉鎖時の音響インピーダンスを算出する関数で、周波数 f [Hz]、音響管の断面積 S [m²] と長さ l [m] および媒体の流れ抵抗 σ [N·s/m⁴] を与えると、上流端の音響インピーダンス Z が得られる。

FuncZOrifice($f, d, l, \delta_1, \delta_2$) は式(5)に示した共鳴孔の音響インピーダンスを算出する関数で、周波数 f [Hz]、共鳴孔の直径 d [m] と長さ l [m]、共鳴孔両端の縮小比 δ_1, δ_2 [-] を与えると、共鳴孔の音響インピーダンス Z が得られる。

FuncTtoTL(T, S_1, S_0) は式(12)に示した四端子定数で与えられる音響構造の透過損失を算出する関数で、四端子定数 $T = [t_{11}, t_{12}, t_{21}, t_{22}]$ と上流側および下流側の断面積 S_1, S_0 を与えると透過損失 T [dB] が得られる。

FuncF0Resonator(S_0, N, d_h, h, S_c, l) は式(22)に示した共鳴器型消音器の共鳴周波数を算出する関数で、接続ダクトの断面積 S [m²]、共鳴器の数 N 、一つの共鳴器の共鳴孔の直径 d [m] と長さ l [m]、キャビティの断面積 S_c [m²] と長さ l [m] を与えると、共鳴周波数 f [Hz] が得られる。

Module 10 の FuncWLinedDuct(f, l, d, σ, w_0) は式(24)に示した内張ダクトの方程式を式(29)に示した Newton Raphson 法により解く関数で、周波数 f [Hz]、流路の半幅 l [m] と吸音材の厚さ d [m] および流れ抵抗 σ [N·s/m⁴]、初期値 w_0 を与えると、解 w が得られる。FuncTLLinedDuct(f, l, w) は式(24)の内張ダクトの方程式の解 w が得られた後に透過損失を算出する関数で、周波数 f [Hz]、流路半幅 l [m]、解 w を与えると単位長さあたりの透過損失 T [dB/m] が得られる。Module 10 にはその他、SetCmplx などの関数があるが、これらは FuncWLinedDuct で呼び出される複素演算関数である。複素演算関数は本講座の第 2 回に示した Module 03 でも提示したが、複素数を文字列として扱っているため演算速度が遅く、FuncWLinedDuct での Newton Raphson 法の実行には向かない。そこで、複素構造体 Cmplx を定義し、演算速度の改善を図った FuncWLinedDuct 専用の複素演算関数を使うこととしている。

2.2 消音器関連ユーザー関数の使用例

紹介したユーザー関数による消音器の解析例を図-8~11

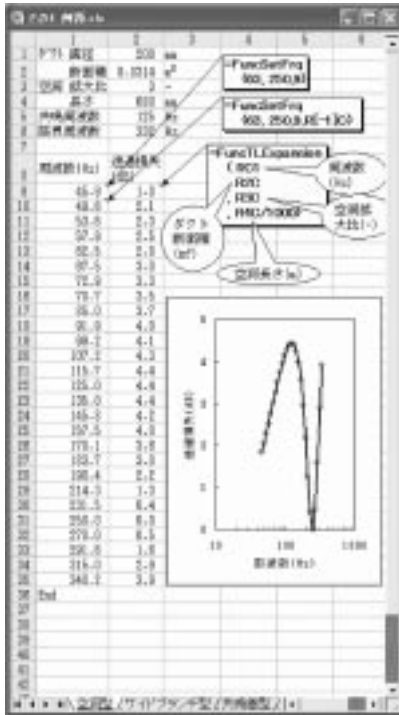


図-8 空洞型消音器の透過損失の解析例

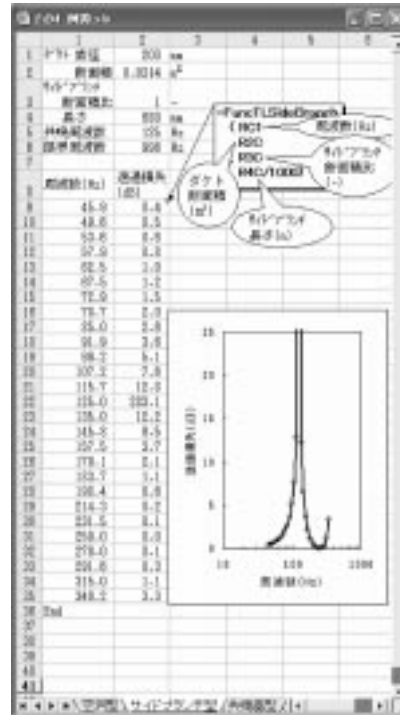


図-9 サイドブランチ型消音器の透過損失の解析例

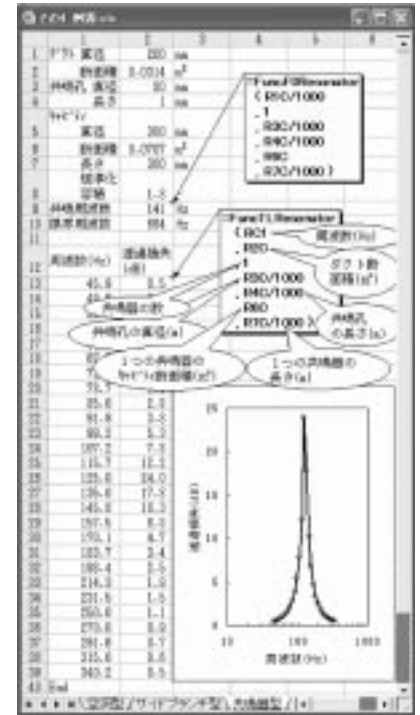


図-10 共鳴型消音器の透過損失の解析例

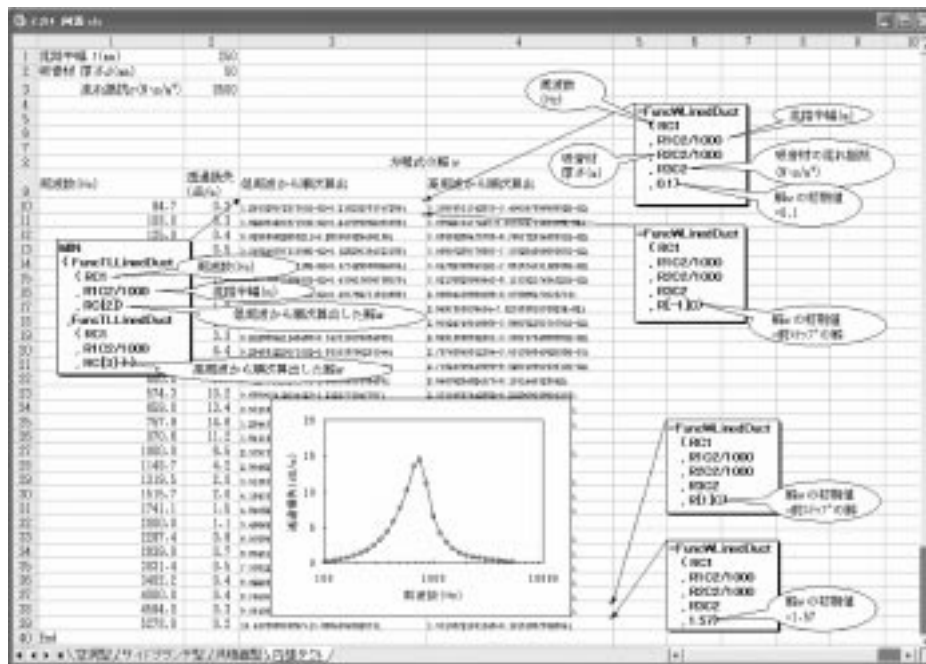


図-11 内張ダクトの透過損失の解析例

に示す。図-8は空洞型消音器の解析例で、FuncTLExpansion(f, S_0, m, l)により特定周波数 f の透過損失 T_L を求めた。ここで、周波数 f は本講座の第2回に示した FuncSetFrqにより求めた。同様に、図-9は FuncTLSideBranch(f, S_0, m, l, σ)によるサイドブランチ型消音器の解析例である。

図-10は共鳴型消音器の解析例で、FuncTLResonator($f, S_0, N, d_h, h, S_c, l, \sigma$)により透過損失を求めた。図-10には FuncF0 Resonator(S_0, N, d_h, h, S_c, l)による共鳴周波数も示したが、FuncF0 Resonatorでは式(6)の共鳴器の音響インピーダンス Z の音響抵抗 R を $R=0$ としており、FuncTLResonatorによる透過損失の最大値

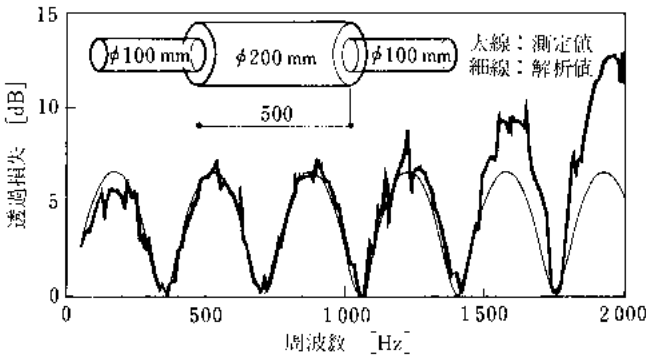


図-12 空洞型消音器の透過損失の比較

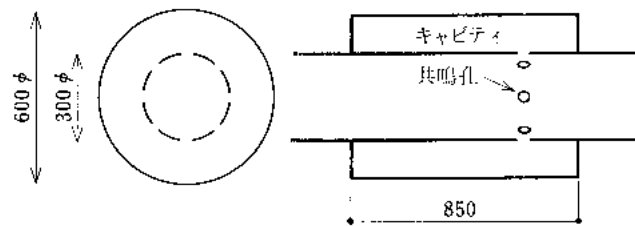
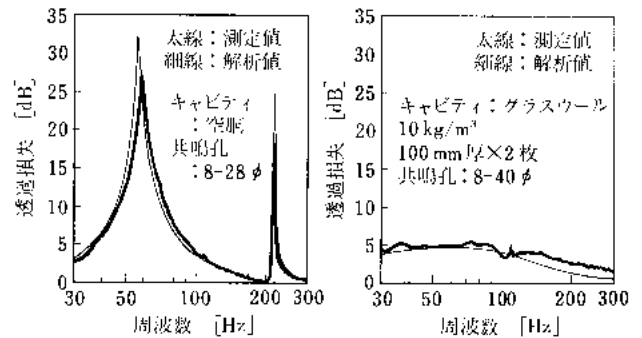


図-13 共鳴型消音器の構成



(a) キャビティが空洞の場合 (b) キャビティに吸音材を充てんした場合

図-14 共鳴型消音器の透過損失の比較

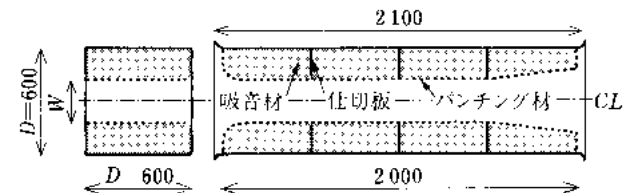


図-15 消音器の構成

とは必ずしも一致しない。

図-11 は内張ダクトの解析例で、まず FuncWLinedDuct (f, l, d, σ, w_0) による内張ダクトの解 w を低周波から順次求め、さらに高周波から順次求めている。したがって、同一周波数で解 w が二つ得られるが、これらを FuncTLLinedDuct(f, l, w) に適用し透過損失を求め、透過損失が小さいほうをその周波数の透過損失としている。このような手順を踏む理由は、Newton Raphson 法では初期値によっては非現実な解を与えることがあり、これを回避するためである。

3. 減音量の解析値と実測値の比較

3.1 リアクティブ消音器の減音量

図-12 に空洞型消音器の透過損失⁷⁾を示す。細線は式(17)と式(18)による解析値、太線は測定値である。空洞型消音器では、消音器として機能する周波数が空洞部の直径から決まる平面波の限界周波数以下に限定される。図-12 の例では空洞部の直径 $D=0.2$ m で、限界周波数は図-3 より約 1 kHz であるが、限界周波数以下で測定値と解析値はよく一致する。

図-13 に示した共鳴器型消音器の透過損失⁸⁾を図-14 に示す。キャビティを円形ダクトの外周に配置し、ダクト壁に等間隔に八つの共鳴孔を開け、共鳴器を構成した。なお、キャビティを空洞とした場合と吸音材を充てんした場合の2方式の共鳴器を製作したが、どちらも共鳴周波数は約 60 Hz であった。解析値は FuncTLResonator($f, S_0, N, d_h, h, S_c, l, \sigma$) で、共鳴器数 $N=8$ 、キャビティ断面積

$S_c = \pi(0.6^2 - 0.3^2)/4$ 、キャビティ長 $l=0.85$ とし求めた。ここで、キャビティには仕切りがないが、各共鳴孔には同じ音圧が作用するので、仕切りがあった場合と同様に八つの共鳴器として機能する。なお、吸音材を充てんした場合の吸音材の流れ抵抗は $\sigma = 3000 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ とした。

図-14 の(a)はキャビティが空洞の場合、(b)はキャビティに吸音材を充てんした場合である。太線で示した測定値と細線で示した解析値はよく一致する。図-14 の(a)で共鳴周波数ではない 220 Hz 付近で透過損失の増加がみられるが、これは共鳴器長 l の影響によるものである。なお、平面波の限界周波数はダクトの直径 $D=0.3$ m で規定される約 665 Hz である。

3.2 吸収型消音器の減音量

図-15 に示す消音器の音響減衰量⁹⁾を図-16 と図-17 に示す。図-16 は流路幅 W が狭い、中間、広いの三つの場合についての比較、図-17 は吸音材の密度が低密度、中密度、高密度の三つの場合についての比較である。

図-16 と図-17 の(a)は残響室法による挿入損失の測定値、(b)は FuncWLinedDuct(f, l, d, σ, w_0) と FuncTLLinedDuct(f, l, w) による無限長の内張ダクトの解析値、(c)は参考として示す二次元境界要素法(BEM)による解析値である。ここで、(b)では図-15 の消音器の端部形状などを無視し、流路の半幅 l が $l = W/2$ 、吸音材厚さ d が $d = (D - W)/2$ の無限長の内張ダクトとみなし解析を行い、長さ 1 m あたりの透過損失を算定し、これを 2 倍し、図-15 に示した長さ 2 m の消音器の透過損失とした。

図-16、図-17 とともに、測定値と解析値はよく一致す

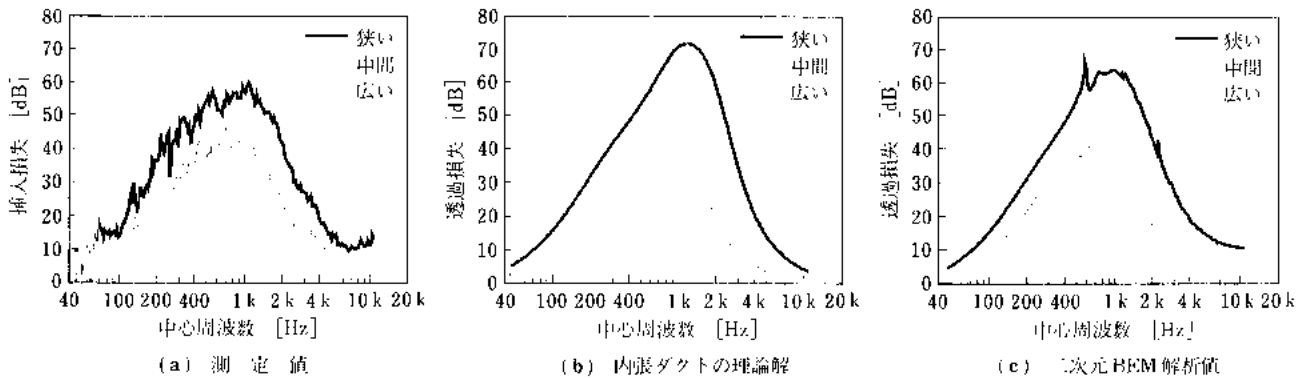


図-16 消音器の流路幅の影響

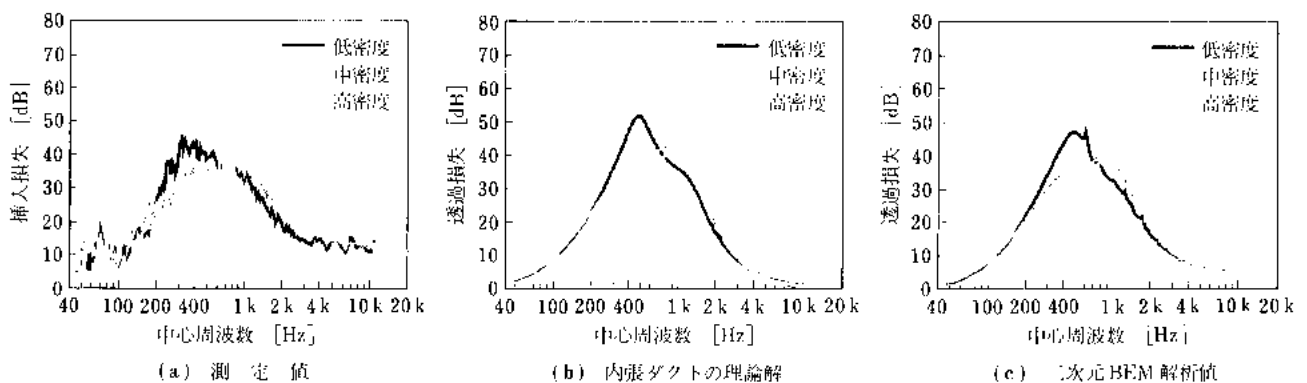


図-17 消音器の吸音材密度の影響

る。なお、(b)の内張ダクト解析値は(c)の二次元BEM解析値よりピーク値がやや大きい傾向がある。この理由としては、図-15に示した消音器では下流流路が徐々に広がるが、内張ダクトの解析ではこれを無視していることが考えられる。

おわりに

リアクティブ消音器の基本的な型式である空洞型とサイドブランチ型および共鳴器型消音器、さらに内張ダクトを取り挙げ、透過損失の解析方法を示し、これらに基づくExcelマクロプログラムを紹介した。測定値と解析値は比較的良好に一致するので、ここで示したマクロプログラムは有用と考えている。特にリアクティブ消音器については、いろいろな消音器を組み合わせることにより特徴的な消音器構成することも可能で、これらの検討¹⁰⁾にも有効である。

参考文献

- 1) 日本騒音制御工学会編：騒音制御工学ハンドブック，技報堂出版
- 2) 日本音響材料協会編：騒音・振動対策ハンドブック，技報堂出版
- 3) 前川純一：建築・環境音響学，共立出版
- 4) 福田基一・奥田襄介：機械の騒音とその対策，共立出版

- 5) D. Christie: Theoretical Attenuation of Sound in Aligned Duct, Journal of Sound and Vibration, 17(1971), pp.283 ~ 286
- 6) 寺尾道仁・関根秀久：吸収型消音装置の数値解析，日本音響学会騒音振動研究会資料，N 2001 57(2001)
- 7) 笹尾博行・吉田 崇：ペアマイクロホン法による消音器の透過損失測定方法の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集(1995)，pp.277, 278
- 8) 笹尾博行・武田浩之・吉田 崇：抵抗を付加した共鳴器対による消音器(その2)，日本建築学会大会学術講演梗概集(1997)，pp.243, 244
- 9) 笹尾博行・竹嶋康之・星野正晴：消音器の透過損失解析値と挿入損失測定値の比較，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(2003)，pp.1621 ~ 1624
- 10) 笹尾博行：多段共鳴器による空調ダクト用消音器その1 ~ その3，日本建築学会計画系論文集，No. 543(2001)，pp.9 ~ 16，No. 551(2002)，pp.17 ~ 22，No. 568(2003)，pp.39 ~ 45

(2006/7/21 原稿受理)



笹尾博行 ささおひろゆき
 昭和30年生まれ/出身地 神奈川県/最終学歴 東京都立大学大学院修士課程修了/学位 博士(工学)/資格 一級建築士，建築設備士

ソースコード

```

Module09_リアクティブ消音器
Function FuncTLExpansion(f, S0, m, L)
' 空胴型消音器の透過損失
' (周波数[Hz], 接続ダクトの断面積[m2], 膨脹比[-], 長さ[m])
T = FuncMatDuct(f, L, 0, S0 * m)
FuncTLExpansion = FuncTtoTL(T, S0, S0)
End Function
Function FuncTLSideBranch(f, S0, m, L, Optional Rf = 0)
' サイドブランチの透過損失
' (周波数[Hz], 接続ダクトの断面積[m2],
' サイドブランチの断面積比[-], 長さ[m], 媒体の流れ抵抗[N*s/m4])
T = "1, 0, " & ImDiv(1, FuncZDuctClose(f, S0 * m, L, Rf)) & ", 1"
FuncTLSideBranch = FuncTtoTL(T, S0, S0)
End Function
Function FuncTLResonator(f, S0, N, dh, lh, Sc, Lc,
, Optional Rf = 0)
' 共振器の透過損失
' (周波数[Hz], 接続ダクトの断面積[m2], 共振器の個数
' 共振孔の径[m], 長さ[m]
' キャピタの断面積[m2], 長さ[m], 媒体の流れ抵抗[N*s/m4])
Sh = 0.25 * WorksheetFunction.Pi() * dh ^ 2
Zh = FuncZOrifice(f, dh, lh, Sh / (S0 / N), Sh / Sc)
Zc = FuncZDuctClose(f, Sc, Lc, Rf)
T = "1, 0, " & ImDiv(N, ImSum(Zh, Zc)) & ", 1"
FuncTLResonator = FuncTtoTL(T, S0, S0)
End Function
Function FuncZDuctClose(f, S, L, Rf)
' 閉管のインピーダンス
' (周波数[Hz], 断面積[m2], 長さ[m], 媒体の流れ抵抗[N*s/m4])
T = FuncMatDuct(f, L, Rf, S)
FuncZDuctClose = ImDiv(FuncMatElm(T, 1, 1) -
, FuncMatElm(T, 2, 1))
End Function
Function FuncZOrifice(f, d, L, r1, r2)
' オフィスのインピーダンス
' (周波数[Hz], 直径[m], 長さ[m], 縮小比)
dlt = FuncDuctFactor(r1) + FuncDuctFactor(r2)
S = 0.25 * d ^ 2 * WorksheetFunction.Pi()
FuncZOrifice = Complex(FuncZresDuct(f, L, d, S),
2 * WorksheetFunction.Pi() * f * Rho0 * (L + dlt * d) / S)
End Function
Function FuncTtoTL(T, Si, So)
' 四端子定数->透過損失
' (四端子定数, 入口断面積[m2], 出口断面積[m2])
tau = ImDiv(2, ImSum(FuncMatElm(T, 1, 1)
, ImProduct(z0 / S1, FuncMatElm(T, 2, 1)) -
, ImProduct(z0 / z0, FuncMatElm(T, 1, 2)) -
, ImProduct(S0 / S1, FuncMatElm(T, 2, 2))))
FuncTtoTL = -20 * Log(ImAbs(tau)) / Log(10)
End Function
Function FuncP0Resonator(S0, N, dh, lh, Sc, Lc)
' 共振器の共振周波数
' (接続ダクトの断面積[m2], 共振器の個数
' 共振孔の径[m], 長さ[m], キャピタの断面積[m2], 長さ[m])
Sh = 0.25 * WorksheetFunction.Pi() * dh ^ 2
dlt = FuncDuctFactor(Sh / (S0 / N)) + FuncDuctFactor(Sh / Sc)
FuncP0Resonator = CD / (2 * WorksheetFunction.Pi() *
* Sqr(Sh / ((Lh + dlt * dh) * Sc + Lc))
End Function
Module10_内装ダクト
Type Cmplx
Re As Double
Im As Double
End Type
Private Function SetCmplx(c) As Cmplx
SetCmplx.Re = ImReal(c)
SetCmplx.Im = ImImaginary(c)
End Function
Private Function CmplxSum(c1 As Cmplx, c2 As Cmplx) As Cmplx
CmplxSum.Re = c1.Re + c2.Re
CmplxSum.Im = c1.Im + c2.Im
End Function
Private Function CmplxSub(c1 As Cmplx, c2 As Cmplx) As Cmplx
CmplxSub.Re = c1.Re - c2.Re
CmplxSub.Im = c1.Im - c2.Im
End Function
Private Function CmplxProduct(c1 As Cmplx, c2 As Cmplx) As Cmplx
CmplxProduct.Re = c1.Re * c2.Re - c1.Im * c2.Im
CmplxProduct.Im = c1.Re * c2.Im + c1.Im * c2.Re
End Function
Private Function CmplxDiv(c1 As Cmplx, c2 As Cmplx) As Cmplx
Dim a As Double
a = c2.Re ^ 2 + c2.Im ^ 2
CmplxDiv.Re = (c1.Re * c2.Re + c1.Im * c2.Im) / a
CmplxDiv.Im = (c1.Im * c2.Re - c1.Re * c2.Im) / a
End Function
Private Function CmplxPower(c As Cmplx, N As Double) As Cmplx
Dim r As Double, a As Double
r = Sqr(c.Re ^ 2 + c.Im ^ 2)
a = Atn(c.Im / c.Re)
If c.Re < 0 Then
a = a + WorksheetFunction.Pi()
End If
End If
CmplxPower.Re = r ^ N * Cos(N * a)
CmplxPower.Im = r ^ N * Sin(N * a)
End Function
Private Function CmplxCos(c As Cmplx) As Cmplx
CmplxCos.Re = Cos(c.Re) * WorksheetFunction.Cosh(c.Im)
CmplxCos.Im = -Sin(c.Re) * WorksheetFunction.Sinh(c.Im)
End Function
Private Function CmplxSin(c As Cmplx) As Cmplx
CmplxSin.Re = Sin(c.Re) * WorksheetFunction.Cosh(c.Im)
CmplxSin.Im = Cos(c.Re) * WorksheetFunction.Sinh(c.Im)
End Function
Private Function CmplxTan(c As Cmplx) As Cmplx
CmplxTan = CmplxDiv(CmplxSin(c), CmplxCos(c))
End Function
Function Func#LinedDuct(f, L, d, Rf, w0)
' 内装ダクトの解
' (周波数[Hz], 流路半径[m]
' 吸音材厚[m], 流れ抵抗[N*s/m4], w の初期値)
Const Eps As Double = 0.00001 ' 収束判定値
Const MaxIter As Integer = 50 ' 最大反復数
Dim itr As Integer
Dim func As Cmplx, funcd As Cmplx
Dim w As Cmplx, w2 As Cmplx, wn As Cmplx
Dim rho As Cmplx, pp As Cmplx
Dim q As Cmplx, qd1 As Cmplx
Dim c1 As Cmplx, c2 As Cmplx, cdl As Cmplx
Call SubPorousMaterial(f, Rf, zp, Gp) ' zp, yp
omg = 2 * WorksheetFunction.Pi() * f
rho = SetCmplx(ImDiv(Rho0 -
, ImDiv(zp, ImDiv(Complex(0, omg), Gp)))) ' rho/pp
pp = SetCmplx(ImSub(ImProduct(ImPower(
ImProduct(Gp, L), 2), -1), (omg / CD * L) ^ 2)) ' P^2
c1 = SetCmplx(1) ' 1
c2 = SetCmplx(2) ' 2
cdl = SetCmplx(d / L) ' d/L
w = SetCmplx(w0)
For itr = 1 To MaxIter
q = CmplxPower(CmplxSum(CmplxPower(w, 2), pp), 0.5)
qd1 = CmplxProduct(q, cdl) qd/L
func = CmplxSum(CmplxProduct(w, CmplxTan(w))
, CmplxProduct(CmplxProduct(rho, q), CmplxTan(qd1)))
w2 = CmplxProduct(c2, w) ' 2w
qd1 = CmplxProduct(qd1, c2) ' 2qd/L
funcd = CmplxSum(CmplxDiv(CmplxSum(w2, CmplxSin(w2))
, CmplxSum(c1, CmplxCos(w2)))
, CmplxProduct(CmplxProduct(rho, w)
, CmplxDiv(CmplxSum(qd1, CmplxSin(qd1))
, CmplxSum(c1, CmplxCos(qd1))))))
wn = CmplxSub(w, CmplxDiv(func, funcd))
Errr = WorksheetFunction.Max(
Abs((wn.Re - w.Re) / wn.Re)
, Abs((wn.Im - w.Im) / wn.Im))
w = wn
If Errr < Eps Then Exit For
Next itr
If w.Im >= 0 Then
Func#LinedDuct = w.Re & "+" & w.Im & "i"
Else
Func#LinedDuct = w.Re & w.Im & "i"
End If
End Function
Function FuncTL#LinedDuct(f, L, w)
' 内装ダクトの透過損失
G = ImDiv(ImPower(ImSub(ImPower(w, 2)
, (2 * WorksheetFunction.Pi() * f * L / CD) ^ 2), 0.5), L)
FuncTL#LinedDuct = 8.6859 * ImReal(G)
End Function

```