

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoiseの 構造音響強連成による減衰を含む透過音の解析

松原 聖*

Acoustic-structure interaction analysis with dumping for the acoustically transparent wall by Advance/FrontNoise

Kiyoshi Matsubara*

当社ではこれまで音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise に関する連成機能として、構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR[1]との一方向の構造音響連成解析機能を提供してきた[2]-[5]。ここでは、構造解析で求めることができた振動（変位）を音源とした音響解析機能を提供してきた。この機能は構造物の振動を音源として音波の空気中の伝播をシミュレーションする機能である。ここでは、音波による空気の振動は構造物の振動に影響しないという仮定、すなわち、構造解析から音響解析への一方向の影響（一方向連成、弱連成）を仮定している。この機能は実用上有用であり、かなりのケースで利用されてきた。

このような状況の中で、いくつかの解析では空気の振動が構造の振動に影響を及ぼすケースもあり、構造音響双方向の連成機能のニーズが出てきた。例えば、構造物を透過する音の解析である。このニーズに応えるため、われわれは従来の音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise のひとつの機能として、構造物に減衰を含む周波数領域における構造音響の双方向連成機能（強連成）を開発した。ここでは、構造物の振動に関する情報を固有値・固有ベクトルという形のデータで音響解析に投入し透過音を解析する構造音響強連成機能を実装した。すなわち、構造物の振動を固有値・固有ベクトルを通して直接的に音響解析の基礎方程式に持ち込み、それをまとめて解くという双方向連成（強連成）の定式化を利用した。また、構造振動に関する減衰については、レーリー減衰の形で取り入れた。本稿では、本機能の定式化およびその計算事例について述べる。

Key word: 音響解析、構造解析、双方向連成、音響構造強連成、構造減衰、周波数領域、並列計算

1. はじめに

一般的に、定量的に正しい予測結果を得るための音響解析を実施するためには、多くの音の伝播経路を検討しなければならない。例えば、室内の騒音を考えた場合に限っても、次のような音の伝播経路が考えられる。室外の騒音からの直接の音に加え、その他の音の伝播経路としては、開放された窓等から伝わってくる音、閉じた窓から窓を通して伝播してくる音、排気ダクトを通して伝播してくる音、地面を伝播してくる振動や音等が考

えられ、耳に到達する音のさまざまな原因が考えられる。

これに対して、通常音響シミュレーションでは、主として、音の伝播する主として空気中の音の伝播をシミュレーションするものであった。また、音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise でも、同様の状況であり、周波数領域で音の伝播する媒体中のみの音の伝播を解析する機能のみを有していた。

ここでは、まず構造音響強連成の例題として、図1に示すような隙間のある箱からその外部への音の伝播について考えてみる。従来の機能では、

*アドバンスソフト株式会社 代表取締役社長
President, AdvanceSoft Corporation

隙間から洩れる音については解析可能であるが、箱（構造物）を通して伝播する音は解析できなかった。しかし、実際の音の伝播では、そのような構造物を透過する音も重要となってきた。さらに、これまで本ソフトウェアのユーザーからは、構造物を透過して伝播する音の解析のニーズが高まってきた。今回の音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise の改良では、構造物の固有値・固有ベクトルを利用して、構造物を通して伝播する音を解析する機能を追加した。

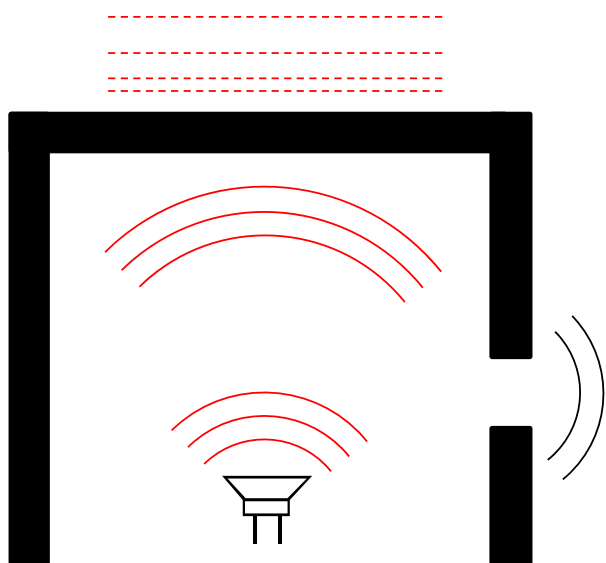


図 1 透過音の解析機能

今回開発した機能は、この例では、閉じた箱の壁を通して伝播する音を解析するものである。もちろん、壁はその固さや厚さおよびその形状によって、外部から内部への音の伝播の様子が異なる。今回開発した機能では、それらの窓の形状やその固定状態、および壁の性質を含めたすべての条件を、固有値・固有ベクトルの情報に集約して取り扱う手法を採用した。音響解析の対象には、洩れる音のみが有意な解析対象もあるが、構造物を通した音の伝播が有意な解析対象もある。本バージョンでは、構造物を通して伝播する音を対象に解析を行うことが可能となった。

実際の音の伝播は複雑であるため、表面や構造物中の構造物の取り扱い等いろいろなモデル化を考えていかなければならない。また、その他に

も考慮しなければならない状況が多数ある。構造物を通して音響が伝播する状況に対しては本機能を実装したことにより対応することが可能となった。このような状況の下、本ソフトウェアに構造物の透過音解析の機能を組み込んだことにより、より複雑な解析を実施するためのひとつの道具が準備できたと考えている。

2. 構造減衰を含む透過音解析機能の定式化

2.1. 定式化の特長

本ソフトウェアにおける音響構造強連成の手法は、周波数領域での音響構造双方の方程式を周波数領域で組み合わせ、ひとつの系（離散化した場合にはひとつの行列で表すことのできる線形方程式となる）にして、同時のその方程式を解く手法である。構造の振動については従来のモード解析の手法を利用している。すなわち、運動方程式を周波数領域に展開した式を利用している。音響解析には、従来からの周波数領域での音響解析の基礎方程式を利用している。

今回の機能追加については、音響解析ソフトウェア Advance/FrontSTR の持っている機能をフルに音響解析に生かすため、固有値および固有ベクトルで音響解析ソフトに渡すという方法を採用した。さらに、構造解析の情報としてその構造物の固有値および固有ベクトルを利用する方法には、次のような利点がある。例えば、今後、ユーザーのニーズにより音が伝播する構造物の構造解析に必要な機能が増えたとしても、全体の仕組みを変更することなく Advance/FrontSTR で開発した線形解析に関する機能・新しい要素・新しい材料がすべて、固有値・固有ベクトルを通して反映できるというメリットがある。本方法を採用した理由は、以上の通りである。

2.2. 音響解析の基礎方程式

本システムでは、解くべき変数を音響速度ポテンシャル $\Psi(x, t)$ とする。以降、 x は 3 次元における位置を表し、 t は時間である。音響速度ポテンシャルに対して、粒子速度 $V(x, t)$ 、音圧 $P(x, t)$ が次のような関係にある。

$$V(x,t) = \text{grad}(\Psi(x,t)) \quad (1)$$

$$P(x,t) = -\rho \frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial t} \quad (2)$$

この音響速度ポテンシャル $\Psi(x,t)$ に対しては、通常の波動方程式

$$\nabla^2 \Psi(x,t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Psi(x,t)}{\partial t^2} \quad (3)$$

が成り立つ。ここで、 c は音速である。また、同様に、

$$\nabla^2 V(x,t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 V(x,t)}{\partial t^2} \quad (4)$$

$$\nabla^2 P(x,t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P(x,t)}{\partial t^2} \quad (5)$$

が成り立つ。ここで、音響速度ポテンシャル $\Psi(x,t)$ を Fourier 展開

$$\Psi(x,t) = \sum_{\nu=1,\infty} \varphi_\nu(x) e^{-i\omega t} \quad (6)$$

$$\omega = 2\pi\nu \quad (7)$$

をする。各周波数成分 $\varphi_\nu(x)$ に対して、

$$\nabla^2 \varphi(x) + k^2 \varphi(x) = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (8)$$

$$k = \frac{2\pi\nu}{c} \quad (9)$$

となり、Helmholz 方程式に変換することができる。ここで、 $\varphi_\nu(x)$ を $\varphi(x)$ と書いた。以下でも同様の記法を利用することがある。ここで、 $\varphi(x)$ は複素数であり、以下同様である。

2.3. 定式化の確認および記号

前節に述べた音響解析の基礎方程式に対して透過音解析機能の定式化を説明するために、現状の音響の複素行列での定式化を下記の通りとする。

$$(A)(\varphi) = (b) \quad (10)$$

$$\varphi_j, j = 1, n \quad (11)$$

ここで、 φ は節点の音響速度ポテンシャルである。また、 n は節点数である。これを透過音の関係する境界の自由度と分ける。音響速度ポテンシャルの変数の順番を変更して

$$\varphi^1 = \varphi_j, j = 1, k \quad (12)$$

を内部の音響ポテンシャル、

$$\varphi^2 = \varphi_j, j = k+1, n \quad (13)$$

を透過音の関係する境界の節点における音響ポテンシャルとなるように順番を入れ替える。すなわち離散化した行列で表現できる音響方程式は、

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi^1 \\ \varphi^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} \quad (14)$$

となる。既存の音響解析と同様に、音響速度ポテンシャルは、粒子速度および圧力と

$$v = \text{grad} \varphi \quad (15)$$

$$p = i\omega \varphi \quad (16)$$

の関係がある。また、変位 u と粒子速度 v の関係は、

$$v = \frac{du}{dt} \quad (17)$$

より

$$u = \frac{v}{i\omega} \quad (18)$$

である。ここでは、音響解析の定式化では、

$$u(t, x) = u(x) e^{i\omega t}, v(t, x) = v(x) e^{i\omega t} \quad (19)$$

を仮定していることを利用した。以上の関係式を利用して、音響構造強連成の離散化された定式化の行列を求める。

2.4. 透過音のための新たな変数

構造物領域（音が透過する領域）の振動に関する固有値、固有ベクトルを

$$\lambda_j, j = 1, m \quad (20)$$

$$\theta_j, j = 1, m \quad (21)$$

とする。ここで、 m はユーザーの指定する固有ベクトルの個数である。これを用いて、透過する部材の変位 u は、

$$u(t, u) = \sum_{j=1, m} a_j(t) \theta_j(x) \quad (22)$$

と表現できる。ここで、周波数領域での解析のため、

$$a_j(t) = a_j e^{i\omega t} \quad (23)$$

である。従って、本問題では、

$$a_j, j=1, m \quad (24)$$

が新たな変数として解くべき変数として位置づけられる。この変数を利用して、

$$u(x, t) = \sum_{j=1, m} a_j \theta_j(x) e^{i\omega t} \quad (25)$$

と書くことができる。従って、音響と等過音を同時に解析する場合に変数は

$$\varphi^1 = \varphi_j, j=1, k \quad (26)$$

は、音響媒体内部の音響速度ポテンシャルであり、

$$\varphi^2 = \varphi_j, j=k+1, n \quad (27)$$

は音響媒体と構造物境界の音響速度ポテンシャルである。また、

$$a_j, j=1, m \quad (28)$$

は透過する媒体の振動を表現する固有ベクトルに係る係数とする。ここまです定義した変数を基礎変数として利用した場合に、基礎方程式を離散化された解くべき行列は

$$\begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi^1 \\ \varphi^2 \\ a_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d^1 \\ d^2 \\ d^3 \end{pmatrix} \quad (29)$$

の形となることが分かる。

2.5. 各行列の要素

以下では、(28)式の形式で表現した行列のうち、ブロック化した行列の各成分を求める。それぞれのブロックを明確にすることで、解くべき方程式を得ることができる。

2.5.1. ブロックの第1行

まず、(28)式で表現される行列のうち、ブロックの第1行については、それぞれの節点では、透過音とは直接関係しないため、通常の音響方程式と同じく

$$\begin{aligned} B_{11} &= A_{11} \\ B_{12} &= A_{12} \\ B_{13} &= 0 \\ d_1 &= b^1 \end{aligned} \quad (30)$$

である。すなわち、全体の離散化された方程式では、

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi^1 \\ \varphi^2 \\ a_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b^1 \\ b^2 \\ b^3 \end{pmatrix} \quad (31)$$

である。

2.5.2. ブロックの第2行

次に、(28)式で表現される行列のうち、ブロック第2行では、境界の変位が構造物の固有ベクトルによる変位と一致することを利用して、関係式を構成する。すなわち、ブロックの第2行については、

$$u(x, t) = \sum_{j=1, m} a_j \theta_j(x) e^{i\omega t} \quad (32)$$

を満たすことより決定できる。一般的に、変位と音響速度ポテンシャルは

$$u(x, t) = \frac{v(x, t)}{i\omega} = \frac{\text{grad}\varphi(x) e^{i\omega t}}{i\omega} \quad (33)$$

の関係があることから、

$$\frac{\text{grad}\varphi(x)}{i\omega} e^{i\omega t} = \sum_{j=1, m} a_j \theta_j(x) e^{i\omega t} \quad (34)$$

となる。従って、各周波数では

$$\frac{\text{grad}\varphi(x)}{i\omega} = \sum_{j=1, m} a_j \theta_j(x) \quad (35)$$

となる。全体の離散化された方程式系での行列で表すと、

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ 0 & D_{22} & -\Theta_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi^1 \\ \varphi^2 \\ a_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b^1 \\ 0 \\ d^3 \end{pmatrix} \quad (36)$$

となる。ここで、 D_{22} は、

$$D_{22} = \frac{\text{grad}\varphi(x)}{i\omega} \quad (37)$$

となる対角行列であり、通常の音響解析の場合の離散化の定式化と同様の手順から求めることができる。本ソフトウェアでは、四面体を利用して、各節点では、

$$\begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & z_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & z_4 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (38)$$

から求めることができる量を用いて

$$\text{grad}\varphi(x) = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} \quad (39)$$

とあらわすことができる。また、固有ベクトルに関する行列については、式そのものが係数となり、

$$\Theta_{23} = (\theta_{ij}) = (\theta_i(x_j)) \quad (40)$$

となる密行列である。これは、固有ベクトルの情報から求めることができる。

2.5.3. ブロックの第3行

最後に、(28)式で表現される行列のうちブロック第3行では、構造物の振動の運動方程式を利用して構成する。すなわち、音響による音圧が構造物を振動させる様子をモデル化するという意味になる。以下では、第3行について求める。構造物の振動の方程式は、

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f \quad (41)$$

である。これを固有関数展開する。

$$u(t, x) = \sum_{j=1, m} \beta_j(t) \theta_j(x) \quad (42)$$

本式を振動の方程式に代入して、

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1, m} \ddot{\beta}_j(t) M \theta_j(x) + \sum_{j=1, m} \dot{\beta}_j(t) C \theta_j(x) \\ & + \sum_{j=1, m} \beta_j(t) K \theta_j(x) = f \end{aligned} \quad (43)$$

である。ここで、構造物の減衰を考慮するために Rayleigh 減衰、すなわち、

$$C = rM + sK \quad (44)$$

を考慮する。 $\theta_j(x)$ は固有値であり、および、 λ_j は固有値であるため、

$$K \theta_j(x) = \lambda_j M \theta_j(x) \quad (45)$$

である。これを運動方程式に代入して、

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1, m} \ddot{\beta}_j(t) M \theta_j(x) \\ & + \sum_{j=1, m} (r + s\lambda_j) \dot{\beta}_j(t) M \theta_j(x) \\ & + \sum_{j=1, m} \lambda_j \beta_j(t) M \theta_j(x) = f \end{aligned} \quad (46)$$

である。ここで、固有ベクトルは M 直交になるように規格化されているものとする。通常の固有値ソルバーは、 M 直交の固有ベクトルを出力するため、そのまま利用すれば問題はない。特に、当社の構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR についても同じである。次に、両辺の左から別の固有ベクトルの転置を乗じて、

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1, m} \ddot{\beta}_j(t) \theta_k^T(x) M \theta_j(x) \\ & + \sum_{j=1, m} (r + s\lambda_j) \dot{\beta}_j(t) \theta_k^T(x) M \theta_j(x) \\ & + \sum_{j=1, m} \lambda_j \beta_j(t) \theta_k^T(x) M \theta_j(x) = \theta_k^T(x) f \end{aligned} \quad (47)$$

となる。ここで、固有ベクトルが、 M 直交であることから、

$$\theta_k^T(x) M \theta_j(x) = \delta_{kj} \quad (48)$$

である。ここでは、 M 直交の定義式である。これを利用して、

$$\begin{aligned} & \ddot{\beta}_j(t) + (r + s\lambda_j) \dot{\beta}_j(t) + \lambda_j \beta_j(t) \\ & = \theta_k^T(x) f \end{aligned} \quad (49)$$

となる。ここで、透過音媒体の表面変位と音響の境界の変位は同じであるため、

$$\beta_j(t) = a_j(t) = a_j e^{i\omega t} \quad (50)$$

となる。従って、上記の方程式は、

$$(\lambda_j + i\omega(r + s\lambda_j) - \omega^2) a_j = \theta_k^T(x) f_j \quad (51)$$

である。ここで、右辺は音響から伝わる荷重であり、圧力を用いて定義することができる。すなわち、

$$f_j = pS = i\omega\varphi S \quad (52)$$

である。これで行列の全成分を求めることができた。

2.5.4. まとめ

ここまで3つの段階のモデル化を行ってきた。これで、必要な量をすべて決定でき、この式を解くことで、音響ポテンシャルを求めることができる。以上の定式化をまとめると、

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ 0 & D_{22} & \Theta_{23} \\ 0 & P_{32} & D_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi^1 \\ \varphi^2 \\ a_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b^1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (53)$$

となる。ただし、ここで、

$$D_{33} = ((\lambda_j + i\omega(r + s\lambda_j) - \omega^2)) \quad (54)$$

なる対角行列であり、

$$P_{32} = (i\omega S) \quad (55)$$

は圧力から構成される密行列である。

2.6. 離散化された方程式

以上をまとめると、係数行列の形式は下記の通りとなる。

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ 0 & D_{22} & \Theta_{23} \\ 0 & P_{32} & D_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi^1 \\ \varphi^2 \\ a_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b^1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (56)$$

従って、この方程式を解くことにより、透過音解析が可能となる。これは、次元は $n+m$ の複素数の連立1次方程式であり、周波数毎に定められる。ソフトウェアでは、周波数毎に1回の連立方程式を解いて、音響ポテンシャルを求め、その結果を利用して、各種の物理量を求める。

3. ソフトウェアの使用方法

3.1. システム構成

音響構造強連成の機能追加において、必要な入力データは次の通りであり、新たに2つのデータを与える必要がある。まず、構造解析と音響解析との連成面を指定しなければならない。構造解析と音響解析とは、この面を通して、それぞれの物理量を双方向にやりとりする。次に、この連成面における構造物の振動の情報（固有値・固有ベクトル）を入力する。この2つのデータを入力する

ための構造連成ファイルを追加した。それらのデータを与えるためのデータは、本ソフトウェアにおける拡張子は、「*.egs」「*.egv」で与えられる2つのファイルから与えるようなシステムとした。これらを既存の仕組みとまとめて、音響構造強連成の機能追加を行った本ソフトウェアのシステム構成は下記の通りとなる。

表 1 ファイル一覧

(灰色部分が本機能で新規に追加したファイル)

分類	内容	ファイル名	備考
必須	制御データ	*.dat	従来と変更なし
	格子データ	*.inp	同上
境界条件	要素の面指定	*.bcs	同上
	音圧等指定	*.bcv	同上
点音源	節点指定	*.bcn	同上
	エネルギー指定	*.bcq	同上
振動連成	構造物表面指定	*.egs	構造物表面を*.bcsと同じ形式で指定
	振動モード指定	*.egv	節点の振動モード（固有ベクトル）を指定

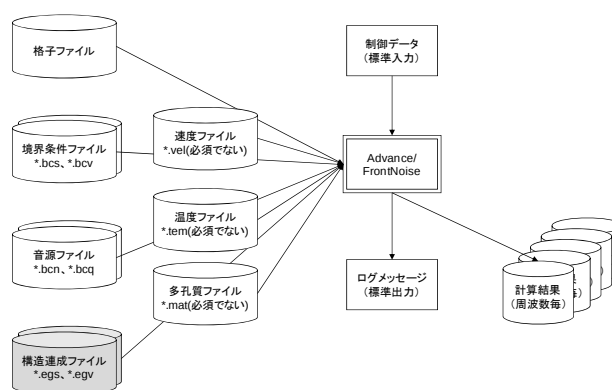


図 2 改良後のシステム構成

(灰色部分が本機能で新規に追加したファイル)

3.2. 利用手順

前節で述べたように、本機能を利用するためには、新たに、*.egs ファイルおよび*.egv ファイルを作成する必要がある。ここで、*.egs ファイルは、*.bcs ファイルを次の作成方法でデータを作

成することができる。作成の過程が少し複雑になるのが*.egv ファイルである。これは次のような理由による。

- ・ 音響メッシュ表面での振動解析の固有ベクトルが必要である。従って、構造メッシュから音響メッシュへのマッピングが必要になる。

ここでは、Advance/FrontNoise の構造音響連成オプションにあるマッピングを利用してこの作業を容易にする仕組みとしている。

この作業では、いくつかの種類のデータを利用するため、「構造解析用データグループ」、「作業用データグループ」、「音響解析用データグループ」の3つに分け、それぞれ、異なるデータ名を利用すると比較的容易に作業を進めることが可能である。

まず、構造解析用データグループ内で固有値解析を実施する。その固有値および固有ベクトルを「*.pch」形式で出力できるようにする。メッシュファイルは「*.fem」ファイルに変換しておく。これらの準備で、従来の構造音響連成の仕組みのひとつであるマッピング機能を利用することができる。その場合には、上流のメッシュには固有値を求めた構造解析のメッシュを利用し、下流のメッシュには、構造音響の連成面のデータを利用する。

次に、連成面のデータについては、「音響解析用データグループ」に属するデータであり、音響解析のメッシュ作成時に境界面の1つのグループとして作成すべきデータである。

これだけのデータが揃った段階で、構造音響の連成オプションを利用することで、連成面の固有ベクトルの情報を作成することができる。

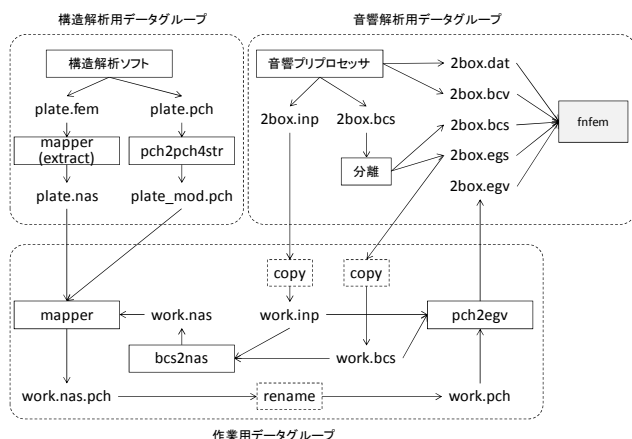


図3 作業フローの例

3.3. 簡単な例題での解析実行手順

本節では、解析したいモデルは下図の通りとする。これは閉じた箱の一部の壁に音源があり、箱の内部の観測点で音圧レベルを評価したい問題である。ただし、箱の内部に音場により振動する面が設置されているケースである。

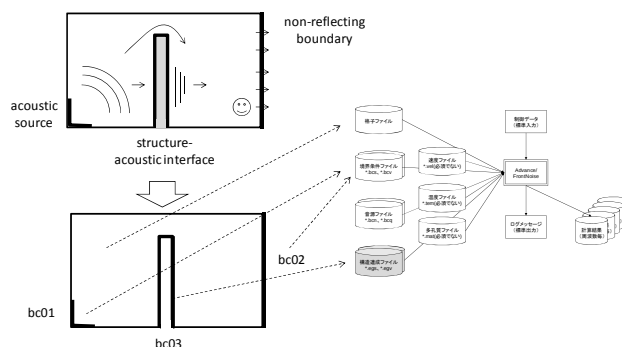


図4 説明のための例題

図では左下の面に振動する面があり、ここが音源となっている。右側の面は、全体が無反射境界である。中央に音場で振動する板状の構造物があり、この壁を透過する音（壁が振動することで観測点に伝わる音）、および、構造物のない部分を伝播して観測点に伝播する音の両方を評価する。

まず、構造物の振動がない状態での音響モデルを作成する。ただし、境界条件を作成することが必要である。すなわち、構造物の表面については、面の境界条件として作成しておく。ここ作成することが必要な条件は、bc01、bc02、bc03の3つの境界条件を指定することが必要である。まず、bc01とbc02は従来の音源および壁境界であり、これまでと全く同じように指定することができる。次に、bc03は構造音響の連成面の指定であり、メッシュ作成時には、bc01とbc02と同じようにして指定を行う。これで、bc03の面データを作成することができた。

次に、振動する部分の固有値と固有ベクトルを求めておく。これはユーザーが手慣れた構造解析の手順で固有値と固有ベクトルを作成する手順と同じである。ただし、最後の出力形式は、構造音響のマッピングツールに合わせて（NASTRAN

形式) おく必要がある。

最後に、従来の構造音響の弱連成の手順で、上流は固有値を指定する構造メッシュ、下流をここで作成した音響メッシュの境界データとしてマッピングを行う。固有ベクトルの音響メッシュへのマッピングが終了すれば、それを固有ベクトルとして構造音響強連成のデータに利用すればいい。

これらのデータが整えば、これらのデータをひとつのディレクトリに置いて実行すればいい。本ソフトウェアにおいては、構造音響強連成計算を行うことを実行環境における環境変数で指定する。すなわち、環境変数で指定をしなければ、これらの固有値固有ベクトル連成面のデータがあっても、従来の計算を行うことができる。構造音響強連成計算を行う場合には、必ず環境変数で機能を ON することを指定しなければならない。

4. 事例 1：振動板を隔てた隣り合う箱

4.1. 解析条件

左の箱と右の箱は壁で遮断されており、音の伝播媒体は左と右でつながっていない。すなわち、音響媒体である空気は、右の部屋と左の部屋で完全に分離されている。ただし、両方の箱の間の小さな窓に振動を伝播する板が設置されており、この板を通して音が伝播する。本解析では、左の箱の左端の全面に音源を設置した。また、右の箱の右端は開放端として p_c 境界を与えた。また、本解析の前提条件として、あらかじめ小さな窓の振動解析を行って、その固有値・固有ベクトルを求めておく必要がある。

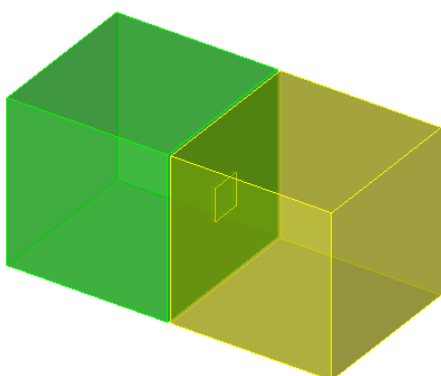


図 5 音響構造連成の解析対象

本解析で期待する結果は、音の伝播媒体は左と右でつながっていないにも関わらず、左の端から、右の端に音が伝播することである。その伝播する音の周波数が小さな窓の固有値に近ければよく音を透過するが、固有値とはなれた音の周波数では音は透過しないことが予想できる。

本解析においては、「参考計算」として、中央の小さな窓も解析領域に含めた場合（両方の箱の間に窓がなく、何も設置されていない状態）についても計算を行った。

解析周波数については、50Hz から 650Hz まで 10Hz 刻みで計算することとした。解析結果の一部については、観測点（右の箱の右端の中央の点）に関する音圧レベルを表示している。また、本解析では、小さな窓の固有値は、200Hz、400Hz、および、600Hz の 3 つの固有振動数を持つ構造物としてのデータを与えた。この 3 つの周波数で小さな窓がより共鳴することで、強い音が伝わることを予想して解析を実施する。

4.2. 構造連成計算をする場合の注意

構造連成計算では、次の量が必要である。それぞれの量を指定するための場所について説明する。

- ・ 構造物表面のメッシュ
- ・ 構造物表面の節点
- ・ 構造物表面に対応する固有ベクトル、それに付随する固有値

このうち、第 1 項目は、*.egs ファイルに出力する。また、第 2・3 項目については、*.egv ファイルにて指定する。

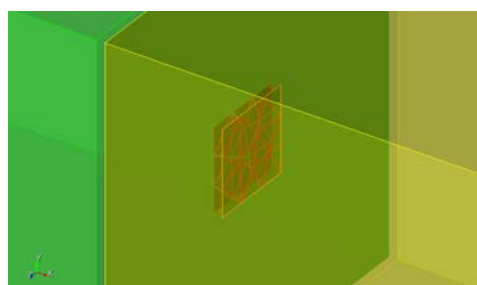


図 6 構造物表面指定ファイル (*.egs) の面

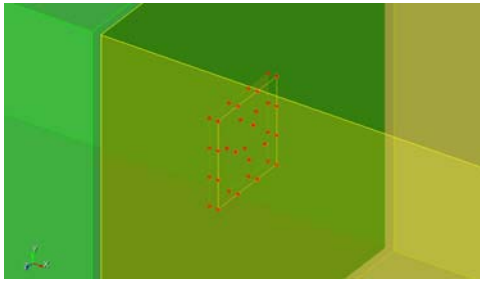


図 7 振動モード指定ファイル (*.egv) で指定する節点

表 2 解析領域および境界条件

	構造連成計算の解析領域	参考計算の解析領域
正面図		
鳥瞰図		
音源境界		
ρ c 境界		

4.3. 解析結果

まず、解析結果のうち、200Hz、300Hz に関する結果をいくつかの視点で掲載した。構造音響強連成計算では、固有値にあたる周波数において、強く音が伝播していることが分かる。

表 3 解析結果（200Hz と 300Hz、全体図）

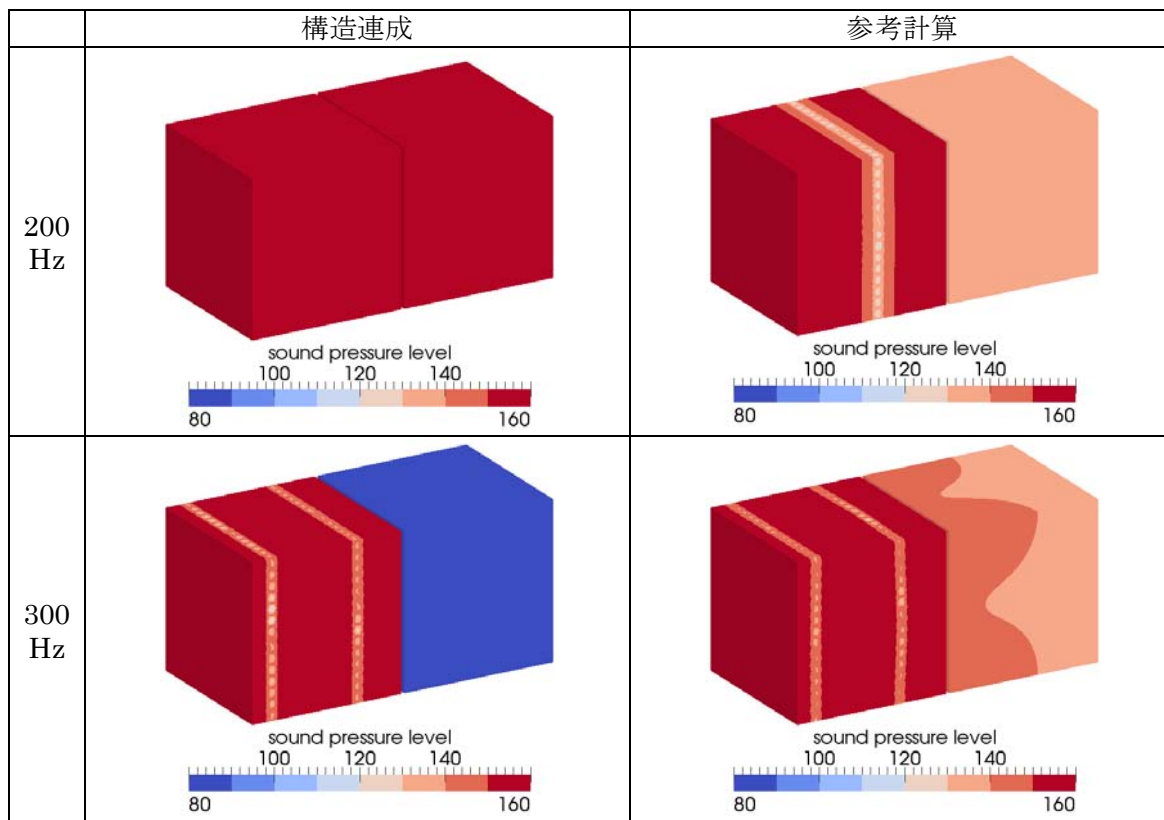
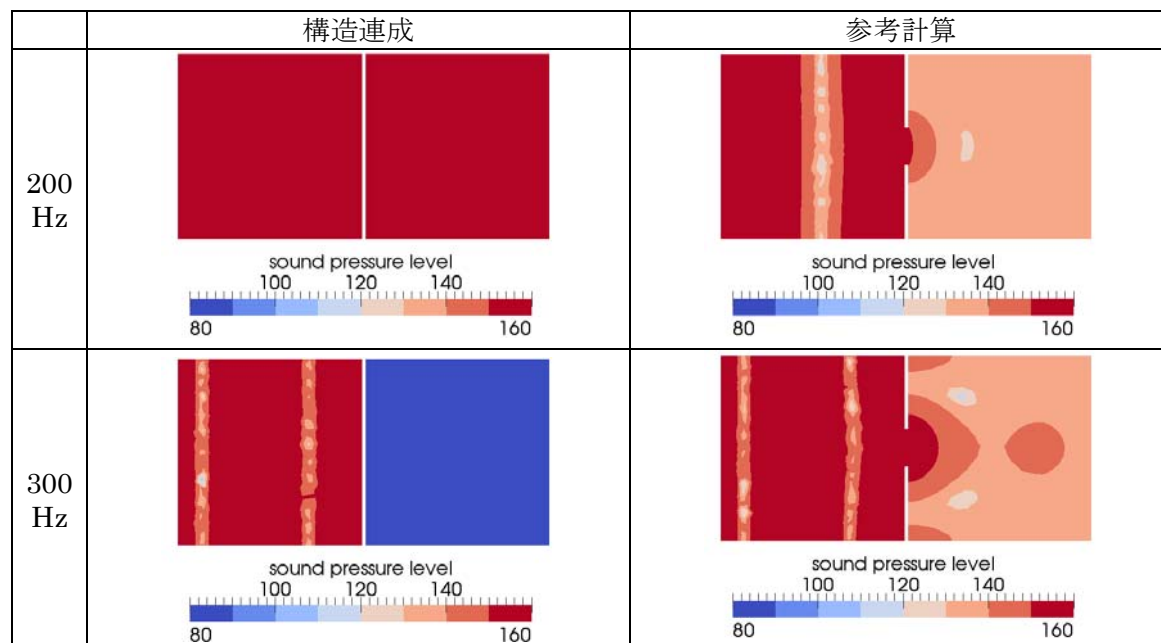
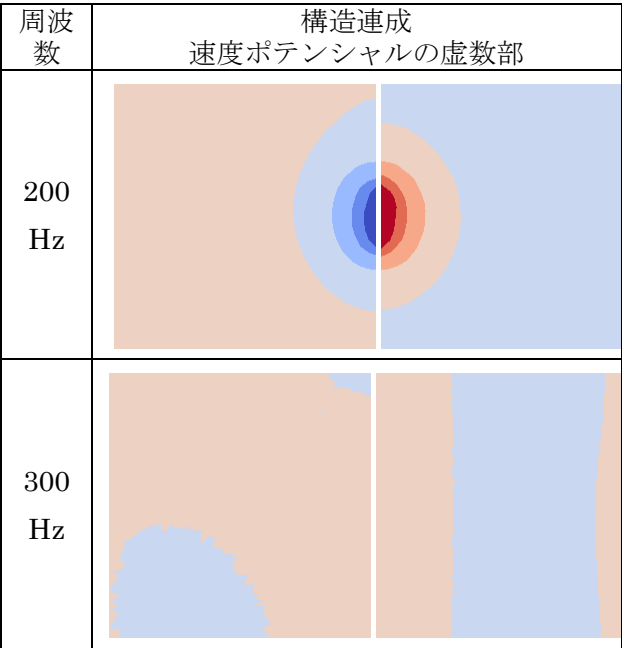
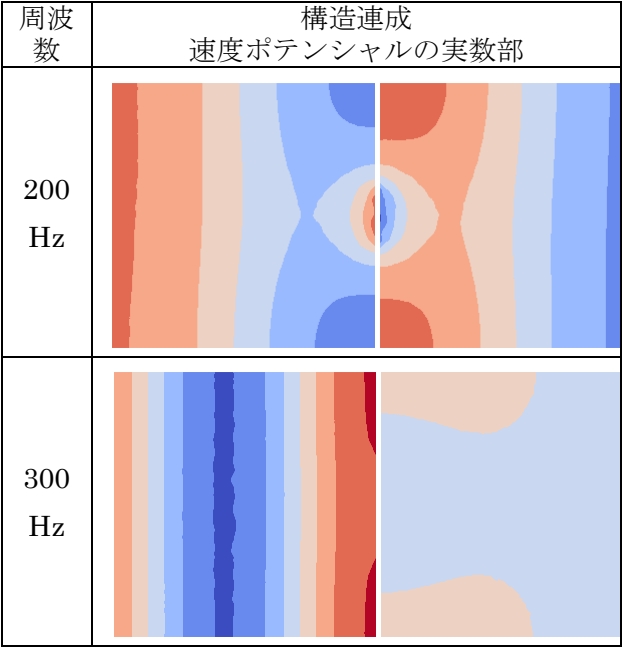


表 4 解析結果（200Hz と 300Hz、断面図）



次に、速度ポテンシャルを見ることにより、真ん中の小さな窓における解の妥当性を確認した。

表 5 構造連成解析の結果
(200Hz と 300Hz、断面図)



4.4. 音圧レベルのまとめ

右の箱の右端の中央部に観測点を設けた。ここでは、当初予想した通り、構造物の振動数に合わせて、透過する音のレベルが高くなっていることが分かる。従って、本計算機能が妥当なことの 1 つを示した。

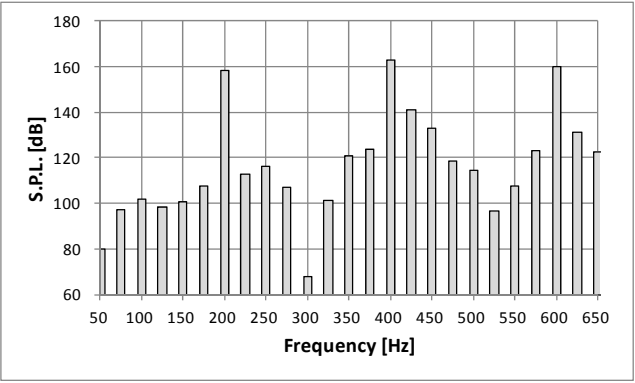


図 8 本計算の観測点における音圧レベル

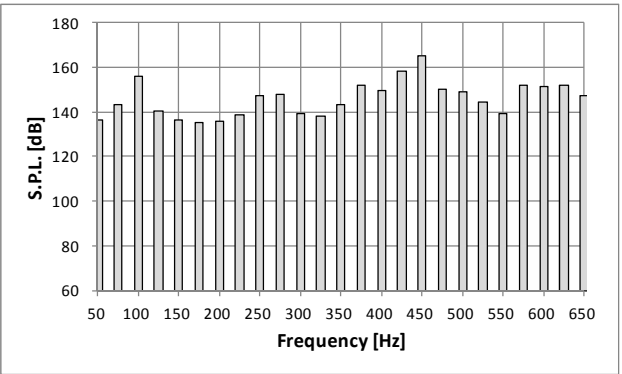


図 9 参考計算の観測点における音圧レベル

4.5. 収束回数

本計算と参考計算の収束状況の違いを、繰り返し回数で比較した。構造連成計算には収束に多くの反復数がかかっている。

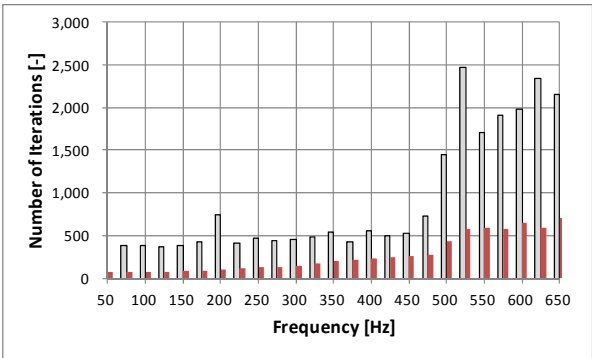


図 10 本計算と参考計算の収束状況の違い

4.6. まとめ

ここでは、固有値や固有ベクトルを理想的な形にしているが、固有周波数に近い波長の音が透過していることが特徴であり、そのような結果を得ることができた。また、前節に述べた反復回数増

加による処理時間の増加については、次の節に示す事例で利用する直接法で解決可能である。

5. 事例 2：減衰壁を含むマフラーの解析

5.1. 解析概要

次に、実用的な例題として、減衰を含む構造音響連成解析をマフラーを対象に実施した。円筒の容器内部に構造物を設置した形式のマフラーである。ここでは、挿入管と穴のあいた板で区切られた構造を持つマフラーを対象とした。解析対象としたマフラーの形状を下記に示す。

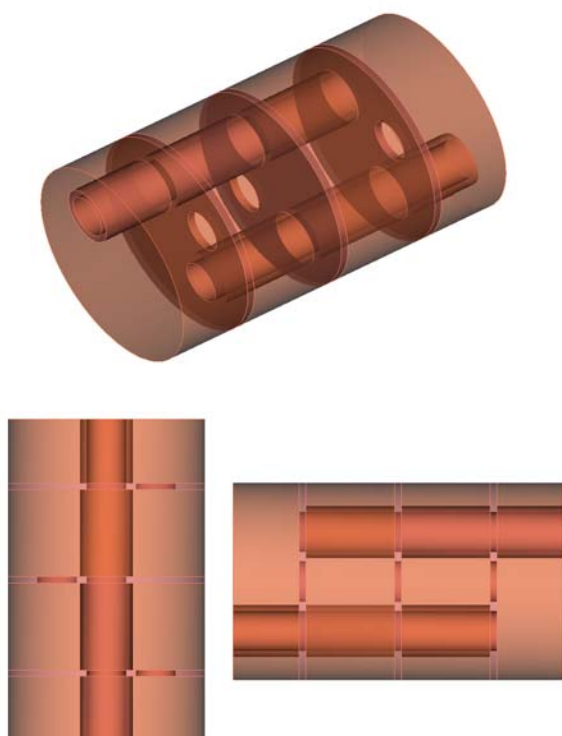


図 11 解析形状

マフラーに対する音源は、入り口に一定の強度で与えたのみである。構造音響連成解を行わない場合には、音の経路にしたがって出口まで音が伝播する。一方、構造音響連成解を行う場合には、入り口から入った音が挿入管および区切り壁を振動させ、その振動が再び音源となって音が伝播する。それらを総合した音が出口に伝搬するという伝播経路である。当然、構造音響連成解を行う場合の方が出口の音圧レベルは高くなることが予測される。

減衰パラメータについては、従来の構造解析で利用する減衰と同様にレーリー減衰で導入して

そのパラメータが利用できる。基本原理が運動方程式に基づいているため、そのような手法が利用可能である。減衰パラメータを入れた場合の音響特性は、共鳴のピーク等が不明確になるという効果が予測される。減衰のパラメータは、構造解析時と同じく実機に適用する場合には合わせ込みが必要である。

5.2. 構造解析領域

ここでは、構造音響連成解析を実施するが、まず、構造解析の形状について示す。構造解析は内部構造物について固有値解析を実施する。

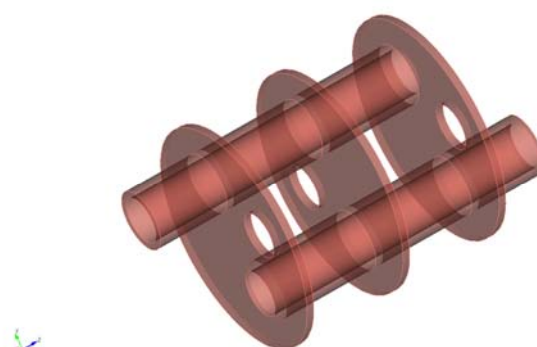


図 12 構造物の形状

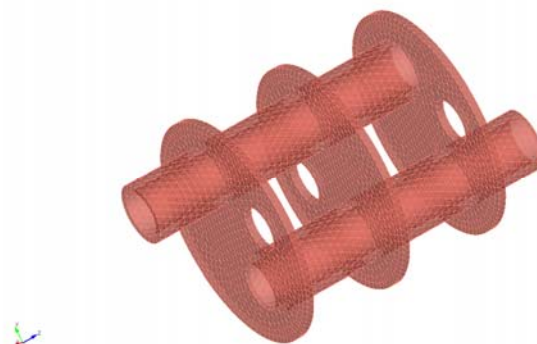


図 13 構造物のメッシュ（ソリッド要素）

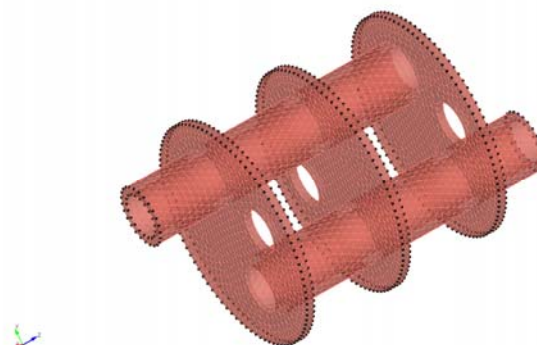


図 14 構造解析の境界条件（自由度固定）

5.3. 音響解析領域

下記に音響解析の形状を示す。また、境界条件としては、入り口音源を与える。出口は ρc 境界とした。また、構造物には振動（音源）を与えない。音響解析の音源により、構造物が振動し、その振動が壁の音源となる。

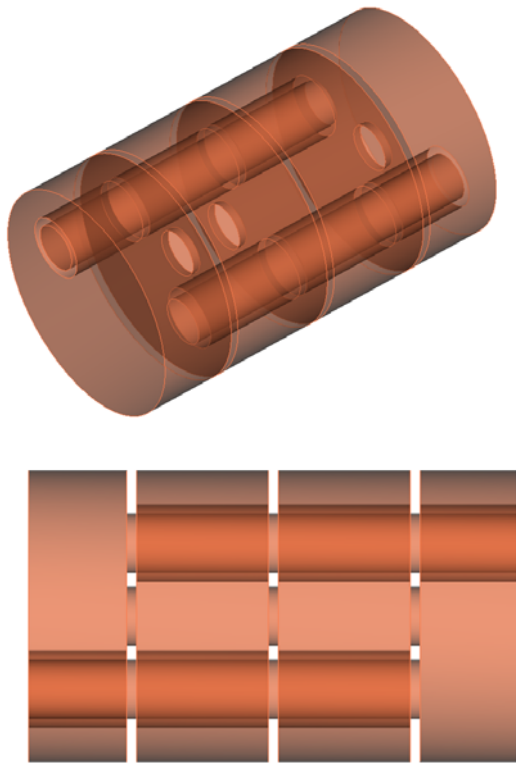


図 15 音響解析の形状

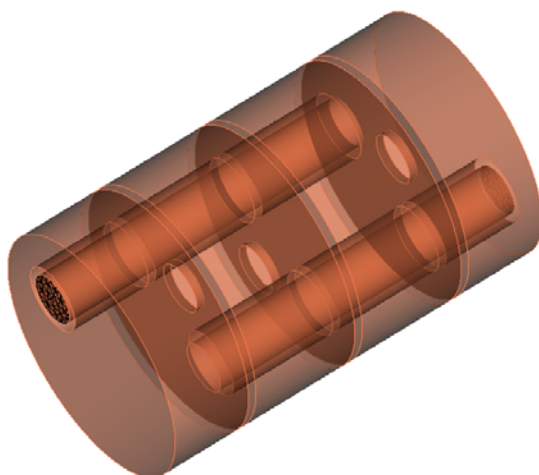


図 16 音響解析の境界条件（黒い部分）

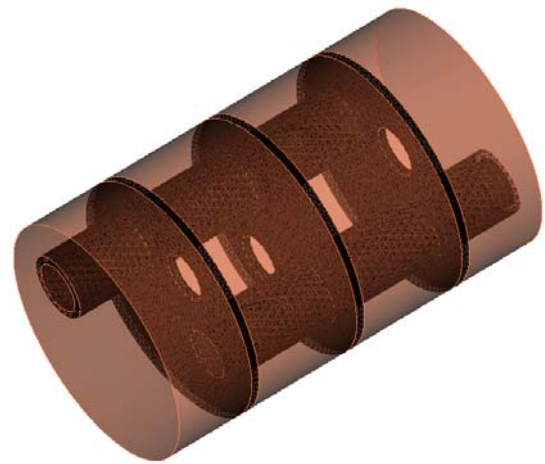


図 17 構造音響連成解析の境界面（黒い部分）

5.4. 解析条件

これらの解析対象について、100Hz～1.2kHzの周波数において 5Hz 間隔の解析を実施した。いずれのケースについても、入り口に音源を設定し、出口付近で音圧レベルを観測した。ここでは、①連成なし、②連成（減衰なし）、③連成（減衰あり）の 3 ケースを実施した。以下ではそれぞれのケースをケース 1～3 と呼ぶことにする。まず、連成なしのケースを実施し、その結果と、減衰なしの連成解析および減衰ありの連成解析を実施し、それらの結果を比較することで、定性的に妥当であることを確認する。

表 6 解析条件

項目	構造解析	音響解析	連成面
節点数	9,111	45,323	7,984
要素数	29,494	229,697	15,340
要素	四面体 2 次要素	四面体 1 次要素	三角形要素
境界条件	円筒接触部分：3 自由度固定 652 節点	入口を音源 47 面 出口 ρc 境界 47 面	構造解析と音響解析の共通面の情報を共有
備考	固有モード数 30 までを利用		

5.5. 構造解析で得た固有値・固有ベクトル

ここでは、30 モードまでの固有値・固有ベクトル

ルを利用した連成解析を行う。構造解析で求めることができた固有値と固有ベクトルを示す。

表 7 固有値一覧

No.	固有値	周波数 Hz
1	5.37E+06	369
2	6.80E+06	415
3	1.06E+07	517
4	1.11E+07	530
5	1.17E+07	543
6	1.32E+07	577
7	1.36E+07	588
8	1.46E+07	609
9	1.52E+07	620
10	1.54E+07	624
11	1.57E+07	631
12	1.60E+07	637
13	1.67E+07	650
14	1.91E+07	696
15	1.96E+07	704
16	2.13E+07	734
17	2.58E+07	809
18	2.85E+07	849
19	2.91E+07	859
20	2.98E+07	869
21	2.99E+07	870
22	3.04E+07	878
23	3.16E+07	894
24	3.24E+07	906
25	3.26E+07	909
26	3.29E+07	913
27	3.35E+07	921
28	3.44E+07	934
29	3.60E+07	954
30	3.65E+07	961

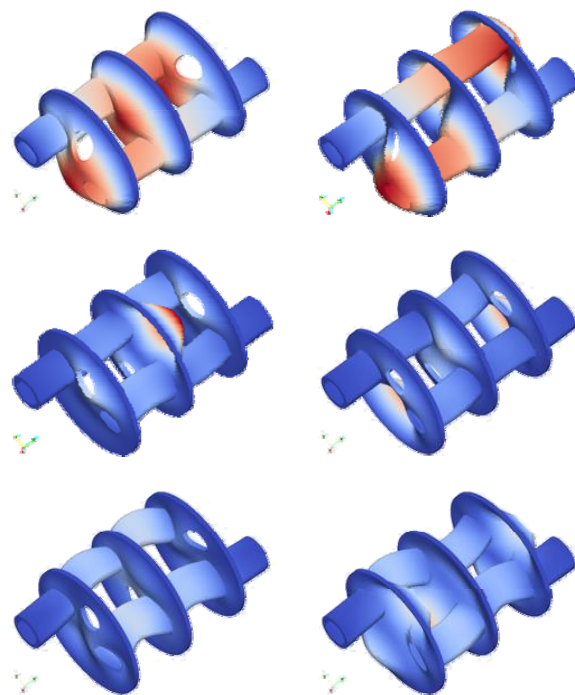


図 18 固有ベクトルの表示（それぞれ左上から右に、第 1,2,4,5,7,9 次モード）

5.6. 解析結果

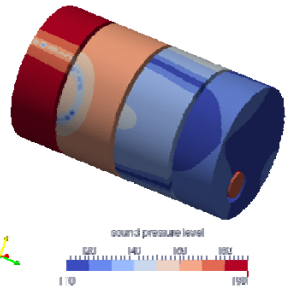
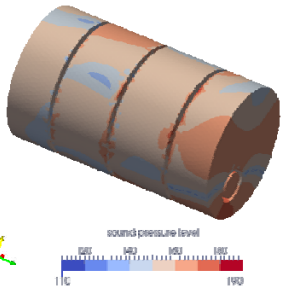
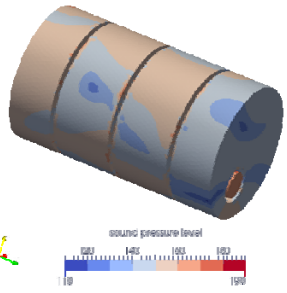
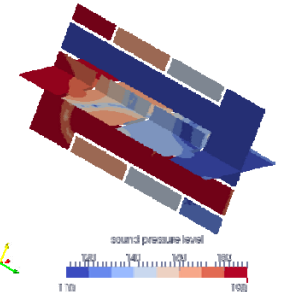
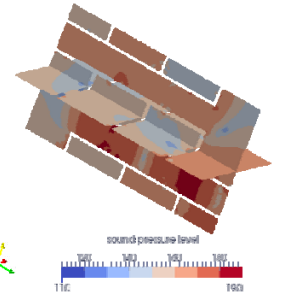
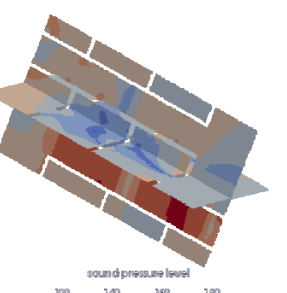
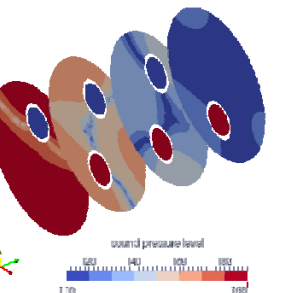
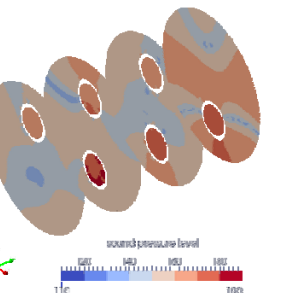
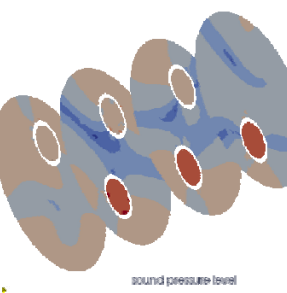
解析を実施した①連成なし、②連成（減衰なし）、③連成（減衰あり）の 3 ケースの音源は単位を均一に与えているため、ここでは、音圧レベルの相対的な値に意味がある。すなわち、音圧レベルの絶対的な値は意味を持たない。

ここでは赤い線が構造音響連成のないケースである。連成しない場合には、構造物を音が透過しないため、入り口から出口までの経路が長いいため音が伝わりにくくなっている。一方、構造音響連成を行った場合には、構造物を透過して音が伝搬するため、出口付近の音圧レベルが高くなっている。また、減衰がある場合（黒い線）と減衰のない場合（青い線）を比較すると、減衰のあるケースの方がピークが緩やかになっていることが分かる。ここでは、減衰のパラメータは、ひとつの例として、レーリー減衰として

$$\alpha = 1e-5, \beta = 10 \quad (57)$$

を与えた。また、参考までに、構造音響連成のないケースについて音響固有値を求め、その共鳴のピークと比較した図を示す。

表 8 3 ケースの解析結果

図種	ケース 1	ケース 2	ケース 3
外面図			
断面図			
断面図			

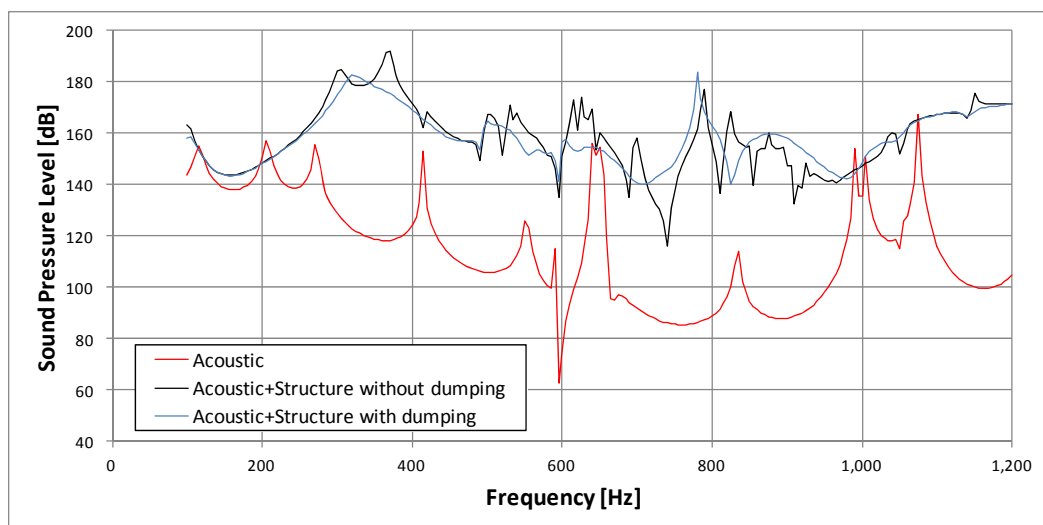


図 19 3 ケースの解析結果の比較

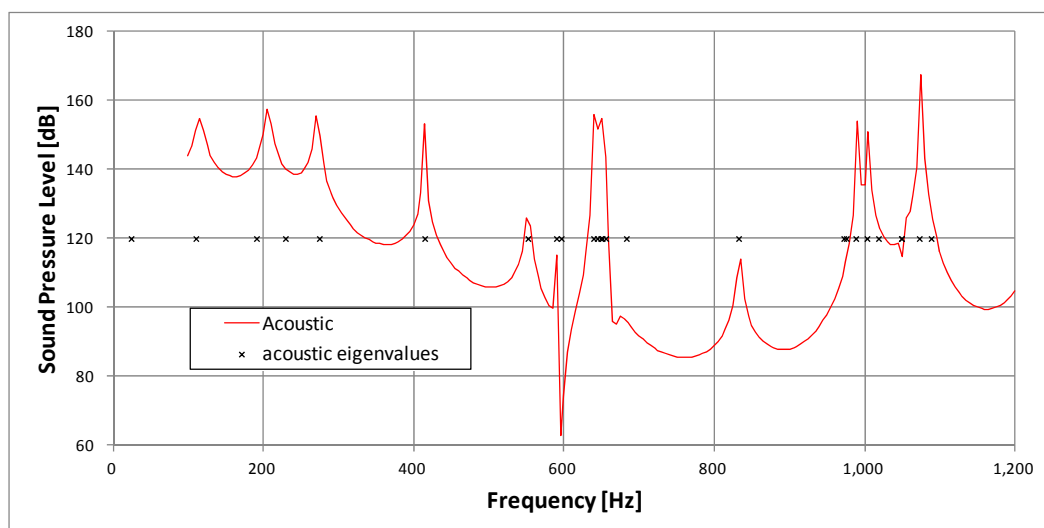


図 20 構造音響連成のないケースでの音響固有値との比較

5.7. まとめ

減衰パラメータの設定が課題である。しかし、ユーザーの持っている従来の構造解析に対する減衰パラメータのノウハウが利用可能である。減衰パラメータについては、従来の構造解析で利用する減衰と同様にレーリー減衰を導入してそのパラメータが利用できる。基本原理が運動方程式に基づいているため、そのような手法が利用可能である。

6. おわりに

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise の機能のひとつとして、音響解析と構造解析について双方向連成機能のニーズに対応した機能を開発した。例えば、本機能を利用することで構造物を透過する音の解析が可能となった。ここでは、壁の振動に関するデータを固有値および固有ベクトルという形で音響解析に与え、そのデータを利用して透過音を解析する定式化を示した。具体的には、構造物の振動を直接的に音響解析の基礎方程式に持ち込み、それをまとめて解くという定式化を利用した。すなわち、構造物に減衰を含む周波数領域における構造音響の双方向連成機能（強連成）を開発し、減衰を含む解析事例について示した。

本機能に関して、今後の課題が 2 つある。1 つめは、減衰を含む事例を積み重ねることで合わせ込みのノウハウを蓄積することである。2 つめは、

大規模解析への拡張である。後者の例題は反復法では収束しないため直接解法を利用しているため、大規模解析への展開がかなり制限を受ける。理想的には、頑強な収束性を持つソルバーの開発であり今後検討を継続する。

参考文献

- [1] 松原 聖, 袁 熙, 末光 啓二, 大家 史, 徳永 健一, “構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR”, アドバンスシミュレーション Vol.10, 2011.12
- [2] 松原 聖, 桑原 匠史, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise の現状”, アドバンスシミュレーション Vol.15, 2013.5
- [3] 松原 聖, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise の解析手法”, アドバンスシミュレーション Vol.15, 2013.5
- [4] 松原 聖, 桑原 匠史, 戸田 則雄, 大西 陽一, 大家 史, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise を利用した連成解析”, アドバンスシミュレーション Vol.15, 2013.5
- [5] 松原 聖, 桑原 匠史, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise の解析事例”, アドバンスシミュレーション Vol.15, 2013.5

※技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、PDF ファイルがダウンロードできます。(ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。)