

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise を利用した連成解析

松原 聖* 桑原 匠史* 戸田 則雄* 大西 陽一** 大家 史*

Coupling Analysis of Acoustic Simulation Software : Advacne/FrontNoise

Kiyoshi Matsubara*, Takuhito Kuwabara*, Norio Toda*, Yoichi Ohnishi** and Fumito Ohya*

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise は、当初、流体解析ソフトウェアや構造解析ソフトウェアとの連成を行うために開発が開始され、主として内部問題に適用してきた。その後、音響解析単独のソフトウェアとしても発展させてきた[1][2][3]。その中では、音響解析の大規模並列計算を特に力を入れて開発を行ってきた。また、Advance/FrontNoise Ver. 4.2 では、これまでに整備してきた連成解析の機能をまとめて、連成解析オプションとして、ユーザー様に提供することになった。ここでは、流体解析と構造解析との連成解析の原理および関連するソフトウェアの機能について述べる。

Key word: 音響解析、周波数領域、大規模計算、並列計算、流体解析、構造解析、連成、有限要素法

1. はじめに

身近には、音響解析と流体解析や構造解析とが関連した現象が多くある。そのような現象については、音響解析単独でシミュレーションはできず、流体解析および構造解析と連成させて解くことになる。Advance/FrontNoise では、2013 年 4 月にリリースした Ver. 4.2 から流体解析および構造解析との連成を、有料オプションでサポートしたバージョンをリリースした。本稿では、本バージョンでサポートしている連成問題の適用範囲およびその連成アルゴリズムについて述べる。

機音、樹木の葉から水滴が落下する音、や水の吸い込みでゴボゴボという音がある。一方、気体による音は、北風によるエオルス音、高速列車のパンタグラフで発生する音等がある[4]等。また、通常の音の伝播とは異なるが、衝撃波もそのひとつである。また、環境騒音としてクローズアップされている発電用風車の音響もそのひとつである。また、車における排気音やエアコンの音、ドアミラーの風切り音も同様である。本ソフトウェアで対象とする音響現象は気体からの発生音を主として取り扱い、音響解析では、その発生音の伝播について解析する。

また、同様に構造解析と音響解析の連成のニーズがある。まず、環境騒音については、このタイプが多い。例えば、振動による発生音の伝播である。例えば、車輪の振動を構造解析で求め、その振動による騒音の環境への伝播を音響解析で求めることができる。このような問題は音響解析では外部問題と呼ばれる。一方、内部問題で連成解析の必要なのは、構造的な振動で、内部が共鳴する場合である。

もちろん音源をあらかじめ与えた上で環境騒音を解析できるが、その場合には音響解析ソフトのみで解析可能である。

2. 連成計算のニーズ

2.1. 対象とする現象

本節では、流体解析、構造解析と音響解析との関連する現象について述べる。

例えば、流体解析と音響解析の関連した現象は次のようなものがある。まず、流れから発生する音は、気体からの発生音と液体からの発生音がある。液体から発生する音は、例えば、電気洗濯

*アドバンスソフト株式会社 第 1 事業部

1st Computational Science and Engineering Group, AdvanceSoft Corporation

**アドバンスソフト株式会社 第 2 事業部

2nd Computational Science and Engineering Group, AdvanceSoft Corporation

2.2. 流体構造-音響解析

音響解析のニーズとして多いのは、流体の壁等の振動により発生する二重極音の解析であるが、近年では、流体から直接発生する四重極音の解析も注目されるようになってきている。この、四重極音の計算手法には、直接法と分離解法の2つがある。直接法は、圧縮性の Navier-Stokes 方程式を解き、流れ場と音場を同時に求める手法であるが、低マッハ数かつ高レイノルズ数の流れから発生する音に対しては、計算コストが大きくなり計算困難なことが多い。一方、分離解法は、Lighthill の音響学的類推に基づく手法[5], [6], [7]で、流れと音の相互干渉がないため（一般に、低マッハ数の流れにおいては、音の圧力変動は、流体的な圧力変動に比べて小さいため、こうした仮定を用いることが可能である）、音源を求める流体解析と、空力音の伝播を求める音響解析を分離して独立に実施することが可能である。

3. 連成解析への取り組み

当社では、流体解析は Advance/FrontFlow/red [8]、構造解析は Advance/FrontSTR [9]、音響解析は Advance/FrontNoise の3つのソフトウェア等を自社商品として取り扱っている。このうち、流体解析と構造解析のソフトウェアは国のプロジェクトで開発され当社で事業化・商品化したソフトウェアであり、音響解析のソフトウェアについては、当社で独自開発したものである。これらはいずれも社内に開発者を擁し、ソースコードでハンドリングする技術を持っている。これらのソフトウェアの標準的な機能を利用いただき検証を継続するとともに、われわれはお客様の要望に応じてソフトウェアをカスタマイズしながら、ソフトウェアを成長させている。

当社設立以来いくつもの連成解析に取り組んできた[10]。その中にはこれまでお客様のニーズに応じてカスタマイズして実施した連成機能も含まれている。例えば、この3つのソフトウェアに関連した連成解析に限っても、次に示すような実績がある。

① 流体→構造；流れによる構造物振動解析

② 流体→音響；流れによる音源による音響解析
 ③ 構造→流体；振動源の流体挙動への影響評価
 ④ 音響→構造；音源の構造物強度への影響評価
 ⑤ 構造→音響；構造物振動に起因する音響解析
 ただし、ここでは、一方向の連成解析のみに限定して議論する。当社では双方向の連成解析の実績もあるがソフトウェアの枠組みが異なるため、本稿では一方向の連成解析について述べる。このうち①の事例は、流体解析から得られたが構造物に与える時系列の荷重を構造物に与え、構造物の構造解析（動解析）を行うものである。また、②については、流体解析で計算された流れに起因して発生する二重極音、四重極音と呼ばれる音源として音響解析を行うものである。③については、振動する構造物が流れに与える影響をシミュレーションした例である。さらに、④については、プラントの音響破壊と呼ばれる現象の評価を行った事例である。最後に、⑤については、構造物の振動を音源とした、音響解析を実施した例である。ここで、3つのシミュレーションのうち2つをシミュレーションする（順番を含めた）組み合わせは6通りあるが、ここで、例をして示していないものは、「音響→流体」のパターンである。音響が流体に影響を及ぼす現象も知られているが、一般に、音響で解析する圧力レベルは流体で解析する圧力レベルよりも桁違いに低いものであり、このような現象を解析するには流体解析に非常に高い精度が要求される。そのため、この組み合わせについては、あまり実用的な解析は実施されていないのが現状である。

以下では、流体解析と音響解析の連成、および構造解析と音響解析の連成のツールについて述べる。

4. 構造解析との連成解析

4.1. 構造解析から音響解析へ渡す物理量

音響解析の音源とするため、構造解析で得られた固体表面の振動速度を渡す。ここでは、振動の速度の代わりに、変位または加速度でも同様の方式となる。

流体解析では、流体解析の領域と音響解析の領

域は同じか、もしくは、音響解析領域に流体解析領域が含まれることが一般的であった。しかし、構造解析では構造解析の対象の外側を音響が伝播するため、それらの領域は互いに重なりあわず、その境界でのみ接していることになることに注意しなければならない。

4.2. 固体表面の振動速度変動による音源

周波数毎に境界法線方向の速度を与える。または、境界法線方向の時系列速度を Fourier 変換して、その係数を与える。

まず、音響速度ポテンシャルの定義より、

$$\begin{aligned} V(x,t) &= \text{grad}(\Psi(x,t)) \\ &= \sum_{\nu=1,\infty} \text{grad}(\phi(x)) e^{-i\omega t} \end{aligned} \quad (1)$$

一方、速度も時間方向に、Fourier 展開して、

$$V_0(x,t) = \sum_{\nu=1,\infty} v_i(x) e^{-i\omega t} \quad (2)$$

と表現する。従って、

$$\frac{\partial \phi(x)}{\partial n} = v_i(x) \quad (3)$$

となる。混合境界条件 $\alpha\phi + \beta \frac{\partial \phi}{\partial n} = f$ の表現で記述すると、

$$\alpha(x)=0, \beta(x)=1, f(x)=v_i(x) \quad (4)$$

となる。また、変位が与えられている場合には、

$$U_0(x,t) = \sum_{\nu=1,\infty} u_i(x) e^{-i\omega t} \quad (5)$$

と置いて、

$$V_0(x,t) = \frac{\partial U_0(x,t)}{\partial t} = \sum_{\nu=1,\infty} (-i\omega u_i(x)) e^{-i\omega t} \quad (6)$$

より、

$$v_i(x) = -i\omega u_i(x) \quad (7)$$

となる。また、加速度が与えられている場合には、

$$A_0(x,t) = \sum_{\nu=1,\infty} a_i(x) e^{-i\omega t} \quad (8)$$

と置いて、

$$v_i(x) = -\frac{1}{i\omega} a_i(x) \quad (9)$$

となる。

4.3. 連成解析の手順

構造解析ソフトウェアから NASTRAN 形式で出力された構造解析の結果を音響解析の境界条件として利用するためのツールを提供する。また、ファイル形式については、各種対応している。

ここで構造音響連成解析として提供するツールは、次の 4 つのツールである。

- **bcs2nas** : Advance/FrontNoise の境界面情報を NASTRAN 形式に変換する。
- **mapper** : 構造解析のメッシュ(fem 形式)と境界条件(pch 形式)から、音響の境界にマッピングし、音響の境界条件を pch 形式で作成する。および、表面データの抽出を行う。
- **pch2bcv** : pch 形式の境界条件を、Advance/FrontNoise の境界条件に変換する。
- **mergebc** : Advance/FrontNoise の複数の境界条件をひとつにまとめる。

音響解析の境界条件には、マッピングしたデータで設定する境界条件と、それ以外の境界条件（例えば ρc 境界）がある。このツールは、その 2 つの区別をして利用する必要があり、その機能を備えている。ここでは、構造解析から出力されたメッシュおよび表面の振動データを、音響解析メッシュの境界にマッピングすることが最初の手順である。そこでマッピングされたデータは、Advance/FrontNoise の境界値データに変換される。

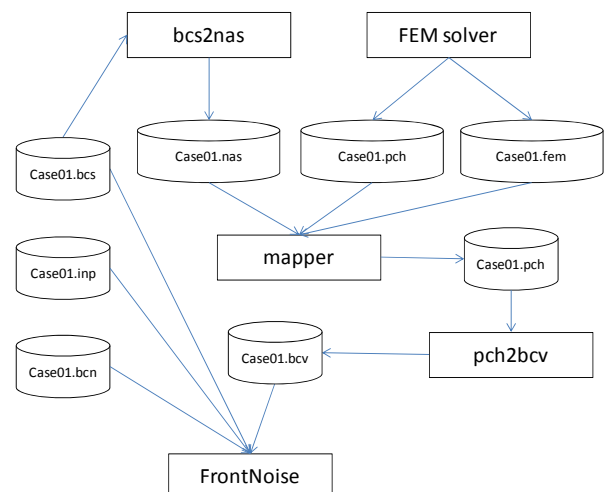


図 1 構造解析連成時のデータの流れ

ここで示したマッピングでは、構造解析ソフト側で周波数空間にマッピングされていることを仮定しているが、次節に流体解析で利用する実空間から周波数空間への変換を行う Fourier 変換のツールを利用することができる。次の図に構造音響連成の計算事例について示す。これは室内に置かれた構造物について構造解析で求められた振動源からの音響伝播を解析している。

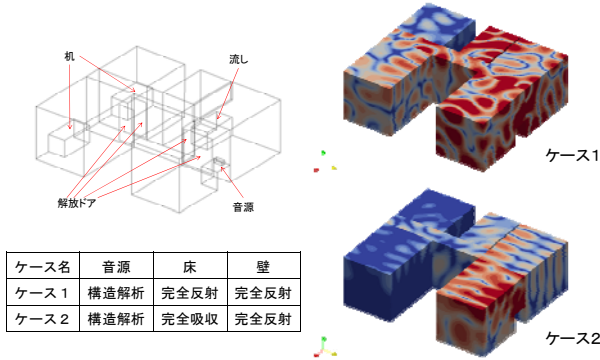


図 2 構造音響解析例（室内の音響評価）

5. 流体解析との連成解析

5.1. 流体解析から音響解析へ渡す物理量

流体における音源となる物理量は、固体表面の流体圧力変動による音源と、流れ場の流体の乱れや渦による音源に関するデータである。

まず、固体表面の流体圧力変動による音源は二重極音源となり、流体の圧力を音響解析に渡す。また、流れ場の流体の乱れや渦による音源の場合には、四重極音源となり、流体解析の流速と密度を音響解析に渡す。ただし、後者の場合には空間の 2 階微分を計算する必要があるため、ある領域での物理量を渡す必要がある。

5.2. 固体表面の流体圧力変動による音源（二重極音源）

まず、圧力の時系列変動で与えられた場合について示す。

$$P_0(x, t) = -\rho \frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial t} = -\sum_{\nu=1, \infty} i\omega \rho \phi(x) e^{-i\omega t} \quad (10)$$

一方、圧力も時間方向に、Fourier 展開して、

$$P_0(x, t) = \sum_{\nu=1, \infty} p_i(x) e^{-i\omega t} \quad (11)$$

と表現する。従って、

$$i\omega \rho \phi(x) = -p_i(x) \quad (12)$$

となる。前述の混合境界条件の表現で記述すると、

$$\alpha(x) = i\omega \rho, \quad \beta(x) = 0, \quad f(x) = -p_i(x) \quad (13)$$

となる。すでに周波数毎の音圧が与えられている場合には、その値を上記の $p_i(x)$ とすればいい。

5.3. 流れ場の流体の乱れや渦による音源（四重極音源）

Navier-Stokes の方程式から音源を導く過程 [11] について説明する。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

から粘性項を無視して、Euler 方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (17)$$

となる。ここで isentropic

$$c = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s} \quad (18)$$

を仮定して、連続の式と運動方程式をそれぞれ x と t で微分して、

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial p}{\partial x_i} = -c^2 \nabla^2 \rho \quad (20)$$

となる。この2式から $\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j}$ を消去すると

$$-\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -c^2 \nabla^2 \rho \quad (21)$$

を得る。これが Lighthill の方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \rho}{\partial t} - c^2 \nabla^2 \rho = \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} \quad (22)$$

である。これを次のように変形した式が音響解析で利用される式である。

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 \rho = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (23)$$

$$T_{ij} = \rho v_i v_j \quad (24)$$

ここで、 T_{ij} は、Lighthill の乱流応力テンソルと呼ばれる項である。Euler 方程式を仮定したが、これは本質的ではなく、Navier-Stokes の方程式から導出すると、

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + \delta_{ij} \left((p - p_0) - c^2 (\rho - \rho_0) \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (25)$$

となる部分が異なるのみである。

次に Lighthill の方程式を周波数空間に書き直す。まず、

$$p - p_0 = c^2 (\rho - \rho_0) \quad (26)$$

を用いて、

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (27)$$

となる。次に音響ポテンシャル

$$P = -\rho \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (28)$$

を用いて書き直すと、

$$\frac{\rho}{c^2} \frac{\partial^3 \Psi}{\partial t^3} - \rho \nabla^2 \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (29)$$

となる。この式を

$$T_{ij} = \sum_{\omega} \tilde{T}_{ij}(x) \exp[-i\omega t] \quad (30)$$

等を用いて周波数成分に直すと

$$\frac{\rho}{c^2} i\omega^3 \varphi - \rho \nabla^2 (-i\omega) \varphi e^{-i\omega t} = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (31)$$

となる、ここで

$$k = \frac{\omega}{c} \left(= \frac{2\pi\nu}{c} \right) \quad (32)$$

を用いると、

$$\nabla^2 \varphi + k^2 \varphi = -i \frac{1}{\rho c k} \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (33)$$

を得る。これは、

$$-i \frac{1}{\rho c k} \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (34)$$

を音源項に与えればよいことを示している。四重極音源を音源とする音響解析では、この方程式を周波数領域で解く。

5.4. 音響解析データへの変換

流体音響解析を実行するためには、まず、流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red を用いて、解析結果の時系列ファイルを出力する。そのデータから、音響解析のツール群の1つを利用して、速度と密度から Lighthill の乱流応力テンソルを求める。次に、ここで求めた Lighthill の乱流応力テンソルの空間での2階微分を計算する。2階微分の計算には、MLSM による近似を利用している。MLSM については、参考文献[11]を参照のこと。以下では、参考文献の記号を利用する。ここで簡単に MLSM のアルゴリズムについて述べる。

$$\phi^h = \{1 \ x \ y \dots\}^T \{\mathbf{a}\} \quad (35)$$

の基底の数を m とする。基底を、

$$p^T = \{1 \ x \ y \dots\}^T \quad (36)$$

と書くことにする。現在は、基底に、

$$p^T = \{1 \quad x \quad y \quad x^2 \quad xy \quad y^2\}^T \quad (37)$$

を利用している。近傍の点数を n とする。A は、 $m \times m$ の行列および B は大きさ m のベクトルとする。また、 u_i を近傍の点の値とする。

$$A(x) = \sum w(x) p(x_i) p^T(x_i) \quad (38)$$

$$B(x) = [\dots, w(x) p(x_i), \dots] \quad (39)$$

$$u = \sum_I p(x) A^{-1}(x) B(x) u_i \quad (40)$$

一方、重み関数も 2 次の関数を利用している。この表現を利用して Lighthill の乱流応力テンソルの 2 階微分を求めた後で、流体メッシュから音響メッシュに物理量をマッピングする。マッピングのアルゴリズムについては、[1]の方法を利用している。マッピングした後は、係数

$$-i \frac{1}{pck} \quad (41)$$

を乗じて、単位を音響解析ソフトウェア Advance/ FrontNoise にそろえる。そこで求めた量が音源となり、音響解析で利用できる。

5.5. 連成解析の手順

以上まとめて、流体－音響解析の手順は以下のような内容となる。

① 流体解析ソフトウェア

Advance/FrontFlow/red の時系列ファイルを音源となる可能性のある場所で出力する。

② 速度から Lighthill の乱流応力テンソルを求める。

③ 乱流応力テンソルの 2 階微分を求める。

④ 流体メッシュから音響メッシュに物理量をマッピングする。

⑤ 係数を乗じて、基礎方程式の右辺に加える。

⑥ 音響解析を実施する。

具体的には次のような手順となる。CFD 形式の結果を音響解析の境界条件として利用するためのツールを提供する。提供するツールは、次の 5 つのツールである。

- indtij : CFD ファイル形式の物理量から Tij を

を計算するためのインデックスを作成。

- caltij : CFD ファイル形式の物理量から Tij を計算する。
- fft4flu2nas : CFD ファイル形式 Tij を nas 形式ファイルに Fourier 変換。
- mapV2V : Fourier 変換した Tij を音響メッシュにマッピング。
- mksurf : 節点上のデータを面データに変換。音響解析の境界条件には、マッピングしたデータで設定する境界条件と、それ以外の境界条件（例えば ρc 境界）がある。このツールは、その 2 つの区別をして利用する必要があり、その機能を備えている。

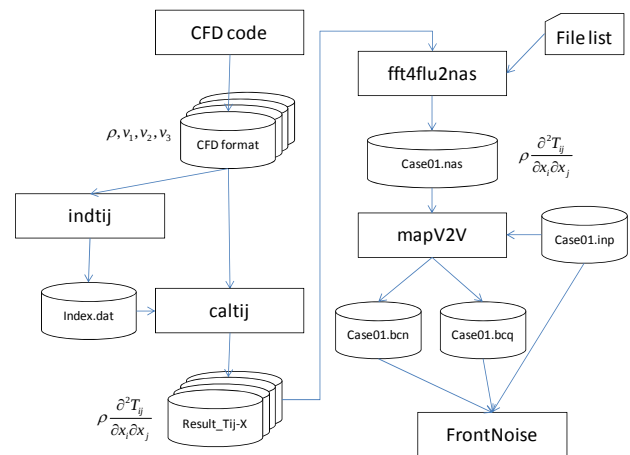


図 3 四重極音源作成のデータの流れ

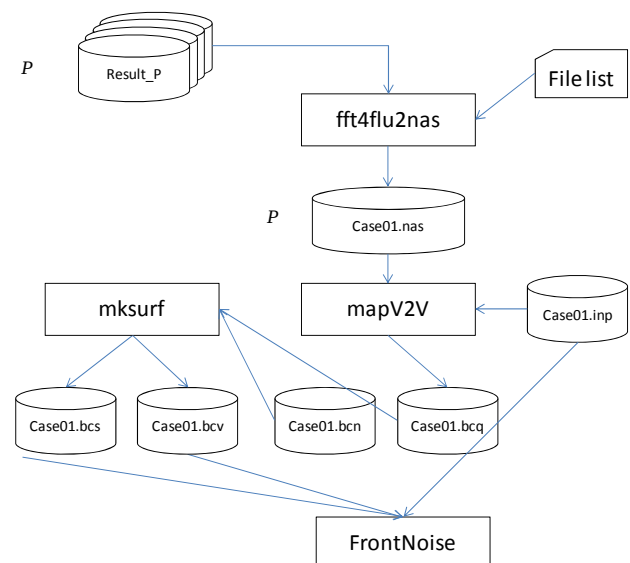


図 4 二重極音源作成時のデータの流れ

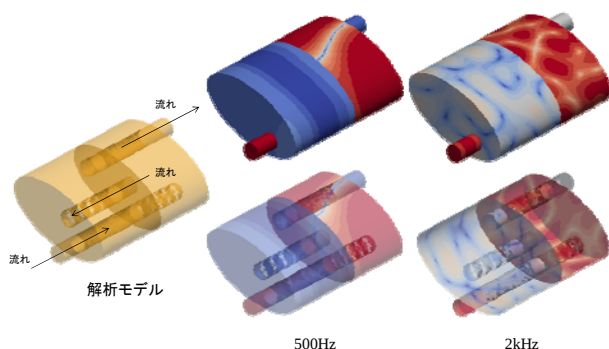


図 5 消音器の透過損失評価

6. 今後の課題

ハードウェアの性能向上により、流体解析を利用した音源の解析が実用的になるにしたがい、そのポスト処理としての音響解析のニーズが増えてきた。

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise では、当社で従来から取り組んできた構造解析との連成に加え、音響の大規模解析の適用により、流体音響連成が可能となった。構造・音響、および、流体音響連成の実績を重ね、その解析手順を音響解析ソフトウェアのツールとして整備した。

今後とも、解析ソフトウェアおよび連成ツール群を実用問題に適用していくとともに、多様な解析ソフトウェアのソースコードをハンドリングできる当社の利点を生かして、ユーザー様からのニーズに応えた連成解析を実施していく予定である。

参考文献

- [1] 桑原 匠史, “Advance/FrontNoise を用いた音響解析”, アドバンスシミュレーション Vol.2, 2010.9
- [2] 松原 聖, 桑原 匠史, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise による大規模解析“, アドバンスシミュレーション Vol.9, 2011.10
- [3] 松原 聖, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise による大規模解析—続報—”, アドバンスシミュレーション Vol.13, 2012.10
- [4] 鈴木 昭次, 西村 正治ら, “機械音響工学”, コ

ロナ社, 2004

- [5] P.M.Morse, K.U.Ingard, "Theoretical Acoustics", Princeton University Press, 1986
- [6] H.S.Howe, "Theory of Vortex Sound", Cambridge University Press, 2003
- [7] C.A.Wagner, T.Huttl, P.Sagaut, "Large-Eddy Simulation for Acoustics", Cambridge University Press, 2004
- [8] 杉中 隆史ら, “Advance/FrontFlow/red Ver.4.1 の概要と特徴”, アドバンスシミュレーション Vol.2, 2010.9
- [9] 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
- [10] 菊池 愛子, 戸田 則雄, “連成解析のためのデータ連携ツール Advance/MPLink Ver.1.7”, アドバンスシミュレーション Vol.4, 2010.11
- [11] G.R.Liu, "Mesh Free Methods — Moving beyond the Finite Element Method—", CRC Press, 2003