

# 音響解析ソフトウェアAdvance/FrontNoiseによる 構造音響および流体音響連成解析

松原 聖\* 戸田 則雄\*

## Coupled Acoustic Simulation on Advance/FrontNoise

Kiyoshi Matsubara\* and Norio Toda\*

アドバンスソフトでは、国のプロジェクト等において開発された計算科学技術用ソフトウェアの実用化・事業化を行っている。これらのソフトウェアの開発者を擁する利点を生かし、ソフトウェアの標準的な機能を活用するとともに、ソースコードを改良することにより個別の事例毎にカスタマイズの必要な連成解析にも取り組んできた[1]。

当社はこのような経緯で連成解析の実績を積み重ね、その中で汎用的に利用可能なモジュールについてはソフトウェアに付属するツールとして整備してきた。この過程で整備してきたツール群は、物理量の変換ツール、異なるメッシュ間での補間等を行うマッピングツール、および、実空間と周波数空間の変換を行うツールの3つに分類できる。本稿では、これらの3種類のツールを利用した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について述べる。

**Key word:** 連成解析、音響解析、構造解析、流体解析、二重極音、四重極音、マッピング、大規模解析

### 1. はじめに

当社では、流体解析は Advance/FrontFlow/red [2]、構造解析は Advance/FrontSTR [3]、音響解析は Advance/FrontNoise[4] 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させていただき検証を継続するとともに、我々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。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

\* アドバンスソフト株式会社 第1事業部

Computational Science and Engineering  
Division I, AdvanceSoft Corporation

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。

本稿では、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。

## 2. 音響解析の基礎方程式

### 2.1. 音響解析ソフトウェアの機能

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise では、音源の位置とその大きさ等を入力として与え、解析領域内の音響速度ポテンシャルや音圧レベルを求める。数値解法には、解析条件が柔軟に設定可能な有限要素法を利用している。また、要素は形状適合性の高い4面体要素を使用している[5][6]。

Advance/FrontNoise の特長は、①大規模解析が可能、②低コストのソフトウェア、③メンテナンス体制である。このうち、大規模解析では、4億要素、8000万節点程度の解析実績がある。また、Advance/FrontNoise では、騒音・音響解析の最小限度必要なコア部分のみを合理的な価格で提供している。複数 CPU での稼動については同一料金を設定している。さらに、自社開発ソフトのため十分なサポート体制がとれ、特定のニーズにカスタマイズが可能である。

表 1 音響解析ソフトウェア  
Advance/FrontNoise の機能

| 項目    |         | 内容                                             |
|-------|---------|------------------------------------------------|
| 基礎方程式 | (1)     | 音響ポテンシャルに関する波の方程式を周波数空間に変換した方程式                |
|       | (2)     | 空間的に分布する場の流れおよび空間的に分布する音響伝播媒体を考慮可能             |
| 解析領域  |         | 内部領域、および外部領域                                   |
| 物性値等  | 速度      | 場の速度を指定可能（デフォルト；速度 0）                          |
|       | 温度      | 場の温度（音の伝播媒体）を要素毎に指定することが可能（デフォルトは均一媒体）         |
| 境界条件  | 面音源     | 壁境界に対して、周波数毎に音圧または粒子速度を設定可能                    |
|       | 点音源     | 節点に対して、単極子、双極子、または、四重極子のパラメータを設定可能             |
|       | インピーダンス | 周波数毎に壁境界に音響インピーダンスを設定可能                        |
|       | 外部境界    | 面（外部境界）に対して、 $\rho c$ 境界を設定可能（音響インピーダンスを与える機能） |
| 数値解法  | 離散化     | 有限要素法                                          |
|       | 要素      | 四面体一次要素                                        |
|       | 並列計算    | 自動領域分割で MPI で並列化                               |
|       | 行列解法    | GMRES 系列の反復法                                   |
| 解析結果  | 大規模実績   | 4 億要素・8000 万節点（四面体一次要素）                        |
|       | 解析結果    | 周波数毎の音響ポテンシャル、音圧、音圧レベルを、バイナリ形式でファイル出力          |
| プリポスト |         | プリポストの正式リリース版はなく、お持ちのプリポストとの接続については、要相談。       |

## 2.2. 音響解析の基礎方程式（速度なし）

Advance/FrontNoise では、音響の基礎方程式を周波数空間に変換し、その周波数空間に有限要素法を適用して解く[7]。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、 $x \in R^3$  は位置を表し、 $t \in R^1$  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  $P(x, t)$  がつぎような関係にある。

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

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

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。また、同様にして、

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

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

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、Helmholtz 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。

## 2.3. 音響解析の基礎方程式（速度あり）

本ソフトウェアでは、速度を含む音響の基礎方程式を解く[8]。速度ありの基礎方程式の解析が可能な手法については、広く利用されている有限要素

素法を利用して計算を行う。音響解析の基礎方程式 convected wave equation は、

$$V(x, t) = \text{grad}(\Psi(x, t)) \quad (10)$$

を用いた形に変形すると

$$\frac{D_0}{Dt} \left( \frac{\rho}{c^2} \frac{D_0 \Psi}{Dt} \right) - \nabla \cdot (\rho \nabla \Psi) = 0 \quad (11)$$

である。ここで、 $\Psi$  は音響ポテンシャル、 $\rho$ 、 $c$ 、および  $v_0$  は、密度、音速、局所的な媒体の流速である。また、

$$\frac{D_0}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_0 \cdot \nabla \quad (12)$$

である。これを、周波数領域で解く。この場合には、

$$\Psi(x, t) = \sum_{\nu=1, \infty} \phi(x) e^{-i\omega t} \quad (13)$$

を仮定している。ここで、 $\omega = 2\pi\nu$  である。この表現を利用して、音圧は、

$$P(x, t) = -\rho \frac{D\Psi(x, t)}{Dt} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} P(x, t) &= \sum_{\nu=1, \infty} p(x) e^{-i\omega t} \\ &= -\rho \frac{D}{Dt} \left( \sum_{\nu=1, \infty} \phi(x) e^{-i\omega t} \right) \\ &= -\rho \sum_{\nu=1, \infty} (-i\omega \phi + v_0 \cdot \nabla \phi) e^{-i\omega t} \end{aligned} \quad (15)$$

$$p(x) = -\rho (-i\omega \phi(x) + v_0 \cdot \nabla \phi(x)) \quad (16)$$

となる。

具体的に、周波数領域の基礎方程式を書き下すと、

$$\begin{aligned} & (1 - M_x^2) \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + (1 - M_y^2) \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + (1 - M_z^2) \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \\ & - \left( 2M_x M_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} + 2M_y M_z \frac{\partial^2 \phi}{\partial y \partial z} \right. \\ & \quad \left. + 2M_z M_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial z \partial x} \right) \\ & - 2ik \left( M_x \frac{\partial \phi}{\partial x} + M_y \frac{\partial \phi}{\partial y} + M_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + k^2 \phi = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

となる。ここで、

$$M_x = \frac{u}{c}, \quad M_y = \frac{v}{c}, \quad M_z = \frac{w}{c} \quad (18)$$

とした。確認のため、速度なしの式は、

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + k^2 \phi = 0 \quad (19)$$

である。この式からは、 $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$  が 1 と比較して小さければ、速度の効果は小さいことが分かる。

## 2.4. 境界条件（および境界面の音源）

境界条件は、各周波数成分  $\phi(x)$  に対して、

$$\alpha(x)\phi(x) + \beta(x)\frac{\partial \phi(x)}{\partial n} = f(x) \quad (20)$$

on  $\partial\Omega$

の混合境界条件を課す[9]。一般には、 $f(x)$  に境界面における音源を与える。例えば、音源となる入口での音響をこの条件で与えることができる。特に、数学的には、 $\beta(x)=0$  のとき Dirichlet 型の境界であり、 $\alpha(x)=0$  のとき Neumann 型の境界条件である。この境界条件は数学的な記述であるが、物理的には、

- ・ 音源となる壁の圧力振動
- ・ 音源となる壁の速度・加速度
- ・ 壁のインピーダンス

を与えることができる。完全反射（剛壁）の条件もこの条件の特殊な場合として表現することが可能である。

## 2.5. 点に与える音源

本ソフトウェアでは境界で与える音源の他に、節点で与える音源が設定可能である。この機能を利用して、点音源、二重極音源、四重極音源を設定することが可能である。

二重極音源は逆位相の点音源を近接させて与える機能である。また、四重極音源は逆位相の点音源のペアを 2 組与える機能である。

流体解析の結果を利用して音響解析を実施する場合には、固体壁付近の圧力変動を音源として与える場合を二重極音源となり、また、流体の乱れに起因する音源を四重極音源となる。ただし、

単独の二重極音源および四重極音源とは別の機能となる。

これらの流体解析で利用する機能を含め、本ソフトウェアで音源として設定可能な機能を下記に示す。

表 2 Advance/FrontNoise の音源設定機能

| 音源    | 単独の音源                                         | 分布する音源                                          |
|-------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 点音源   | 基礎方程式のソース項とする。                                | —                                               |
| 二重極音源 | 1 点を指定することで、二重極音源を計算できる入力ファイルを変換するツールを提供している。 | 初期からの機能。壁の境界条件として、圧力または粒子速度の境界条件として取り扱う。        |
| 四重極音源 | 1 点を指定することで、四重極音源を計算できる入力ファイルを変換するツールを提供している。 | 空間に分布する音源として取り扱う。Lighthill テンソルの 2 階微分の音源を設定する。 |

## 3. 連成解析に関連する各種ツール

### 3.1. ツールの種類

流体音響および構造音響の連成解析を行う場合に重要なツールでは、

- ・ マッピングのツール
- ・ Fourier 変換のツール

の 2 つがある。マッピングでは、面の物理量から異なるメッシュ系の面の物理量に受け渡す面-面マッピングと、体積に分布する物理量を異なるメッシュ系に受け渡すための体積-体積マッピングの 2 種類が存在する。また、Fourier 変換のツールでは、大量のデータを変換するため、その速度に注意する必要がある。

### 3.2. 面から面へのマッピングツール

流体音響連成および構造音響連成においては、通常、流体および構造のメッシュと音響のメッシ

は異なる。異なるメッシュ系での物理量のやりとりをここでは、マッピングと呼ぶ。また、本稿で取り扱う計算（流体音響連成および構造音響連成）においては、先に計算される流体解析および構造解析をここでは「上流」と呼び、その結果を受けて行う音響解析を「下流」と呼ぶ。本節では、上流から下流の物理量受け渡しのためのマッピングの処理について述べる。

下流の節点から、上流の（外表面の）要素の面に、垂線を下ろす。その最短の垂線の長さがあるギャップ以下であれば、マッピングの処理を行う。上流の要素面において対応する要素の物理量を補間で求める。その物理量を下流の節点の物理量とする。ここで、ギャップについては、マッピングしたいユーザーの意図およびモデルの性質によって調整する必要がある。

以上の処理では、下流の面情報は利用していない。以下の場合にのみ利用する。

- ・ 変位を音響の面の境界条件に変換する場合に利用する
- ・ マッピング処理のオプションとして、法線方向を考慮する（順方向/逆方向）/考慮しないのオプションがある。本ケースでは、「考慮しない」オプションを利用した。

特に曲面を含む場合には、マッピングのあとに正しくマッピングされているかどうかを確認することが必須である。

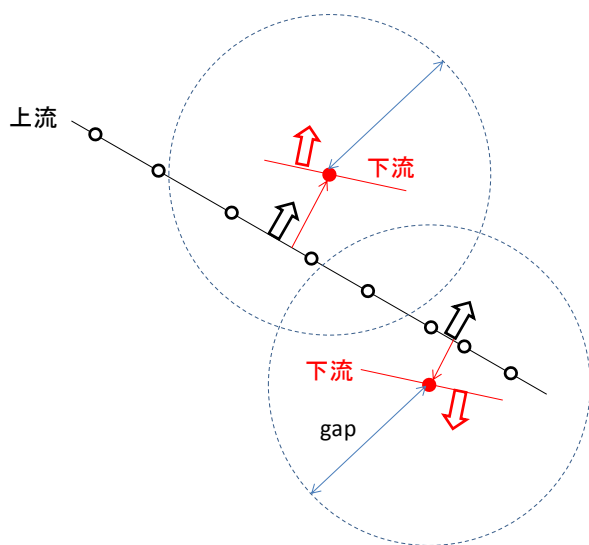


図 1 マッピングのアルゴリズム

### 3.3. 体積から体積へのマッピングツール

上流（音源がある解析対象）の体積から、下流の音響解析の体積にマッピングする場合には、上流の節点が最も近い下流の節点の物理量を受け渡す。ただし、下流の節点に対して、上流の近接点が多い場合には、物理量を平均化する。

ここで、近接点の探索には、バケット法を利用して高速な処理となるように、プログラムを作成している。

マッピングの実行においては、ユーザーが適切なバケットサイズを選択することにより、上流が数百万規模のメッシュ、下流が数百万規模のメッシュである場合にも、1 時間以内でマッピングの処理が可能となっている。

また、前述した面から面へのマッピングについては、処理点数が体積体積マッピングと比較して少ないと考えられるが、ここでもバケット法を利用している。

### 3.4. Fourier 変換のツール

時系列データから周波数データにする場合には、高速 Fourier 変換を利用する。ここでは、例えば、数万節点以上の数の点における数千時刻から成る時系列データを Fourier 変換する必要がある。

例えば、流体解析から音響解析への連成問題で、四重極音源が流体解析の数百万メッシュの範囲に及んだ場合には、その各点での時系列のデータを Fourier 変換する必要が出てくる。この場合には、数千のデータの Fourier 変換を数万回以上繰り返す必要がある。従って、非常に高速に処理される必要がある。また、ここでは、流体解析から音響解析に引き渡すデータ量が数十 GB と大量になることにも注意しなければならない。

このような背景から Fourier 変換のツールには処理速度が要求される。本ツールでは、商用の FORTRAN intel compiler の MKL の Fourier 変換ライブラリ [10] を利用している。図 3.2 はその性能を計測した結果である。横軸が時系列データの点数に相当し、縦軸がその 1 回の処理時間である。○は時系列データの数が 2 の累乗の場合、

●のデータは時系列データの数  $N$  が 10 の累乗の場合である。また、△は処理時間のワーストケースと考えられる素数個数の 2 倍のデータ列の場合である。例えば、下のグラフは、1 万点の時系列データを百万回処理すると、100 秒を要することを示している。ほぼ十分な処理速度と考えている。

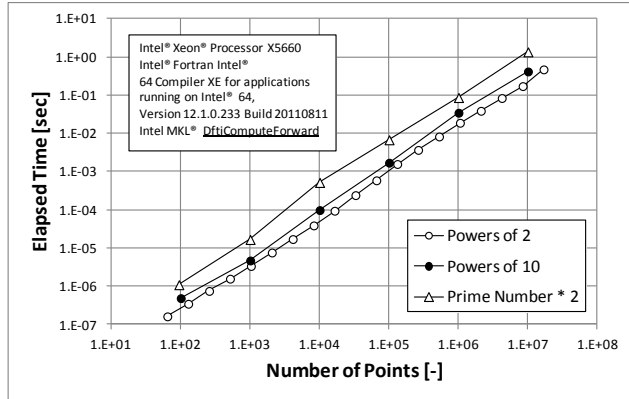


図 2 Fourier 変換の処理性能

## 4. 流体音響連成解析

### 4.1. 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。

### 4.2. 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。

$$P_0(x, t) = -\rho \frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial t} = -\sum_{\nu=1, \infty} i\omega \rho \phi(x) e^{-i\omega t} \quad (21)$$

一方、圧力も時間方向に、Fourier 展開して、

$$P_0(x, t) = \sum_{\nu=1, \infty} p_i(x) e^{-i\omega t} \quad (22)$$

と表現する。従って、

$$i\omega \rho \phi(x) = -p_i(x) \quad (23)$$

となる。上記の数学的な表現で記述すると、

$$\alpha(x) = i\omega \rho, \quad \beta(x) = 0, \quad f(x) = -p_i(x) \quad (24)$$

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。

### 4.3. 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。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (25)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \end{aligned} \quad (26)$$

から粘性項を無視して、Euler 方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (27)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (28)$$

となる。ここで isoentropic

$$c = \sqrt{\left( \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s} \quad (29)$$

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、

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (30)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial p}{\partial x_i} = -c^2 \nabla^2 \rho \quad (31)$$

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

$$-\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -c^2 \nabla^2 \rho \quad (32)$$

を得る。これが Lighthill の方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \rho}{\partial t} - c^2 \nabla^2 \rho = \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} \quad (33)$$

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。

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 \rho = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (34)$$

$$T_{ij} = \rho v_i v_j \quad (35)$$

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、

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + \delta_{ij} \left( (p - p_0) - c^2 (\rho - \rho_0) \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (36)$$

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、

$$p - p_0 = c^2 (\rho - \rho_0) \quad (37)$$

を用いて、

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (38)$$

となる。次に音響ポテンシャル

$$P = -\rho \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (39)$$

を用いて書き直すと、

$$\frac{\rho}{c^2} \frac{\partial^3 \Psi}{\partial t^3} - \rho \nabla^2 \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (40)$$

となる。この式を

$$T_{ij} = \sum_{\omega} \tilde{T}_{ij}(x) \exp[-i\omega t] \quad (41)$$

等を用いて周波数成分に直すと

$$\frac{\rho}{c^2} i\omega^3 \phi - \rho \nabla^2 (-i\omega) \phi e^{-i\omega t} = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (42)$$

となる、ここで

$$k = \frac{\omega}{c} \left( = \frac{2\pi\nu}{c} \right) \quad (43)$$

を用いると、

$$\nabla^2 \phi + k^2 \phi = -i \frac{1}{\rho c k} \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (44)$$

を得る。これは、

$$-i \frac{1}{\rho c k} \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (45)$$

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。

#### 4.4. 流体構造連成の解析手順

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[12]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。

$$\phi^h = \{1 \quad x \quad y \cdots\}^T \{\mathbf{a}\} \quad (46)$$

の基底の数を  $m$  とする。基底を、

$$p^T = \{1 \quad x \quad y \cdots\}^T \quad (47)$$

と書くことにする。現在は、基底に、

$$p^T = \{1 \quad x \quad y \quad x^2 \quad xy \quad y^2\}^T \quad (48)$$

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。

$$A(x) = \sum w(x) p(x_i) p^T(x_i) \quad (49)$$

$$B(x) = [\dots, w(x) p(x_i), \dots] \quad (50)$$

$$u = \sum_I p(x) A^{-1}(x) B(x) u_i \quad (51)$$

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、前節で述べた方法を適用する。マッピングした後は、係数

$$-i \frac{1}{pck} \quad (52)$$

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。

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。

## 4.5. 流体音響連成解析の事例

### 4.5.1. 解析モデル

流体音響解析の事例として、模擬的なマフラーの解析を実施した。解析モデルは下図の通りであり、図中の流れは左側から入り、右側に一度戻されてから左側の出口に向かう。いずれも、消音器

内の流体の出口では、音の減衰効果を期待して、いずれもパンチングとなっている。

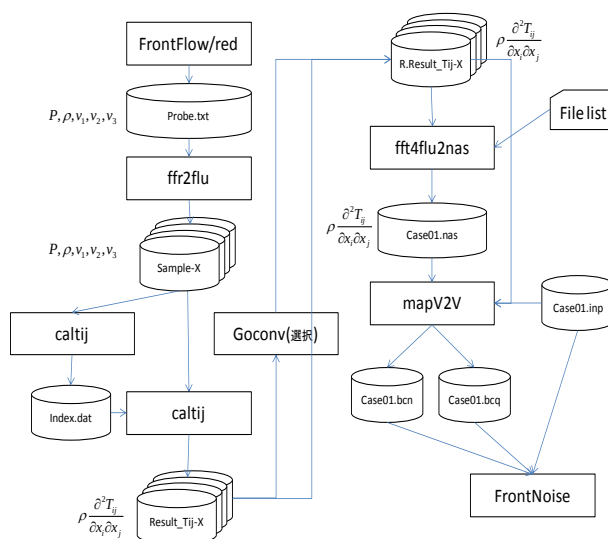


図 3 処理手順

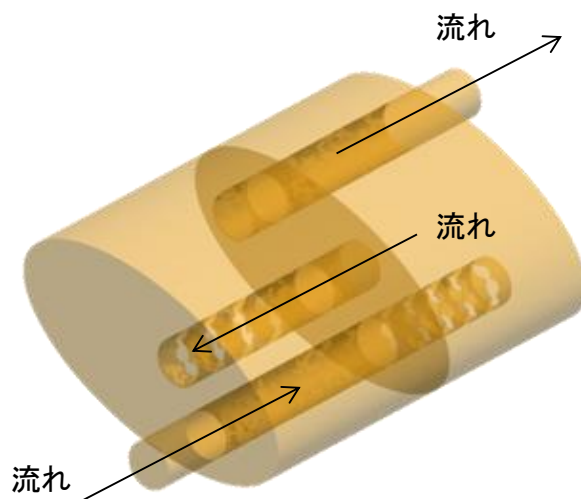


図 4 解析モデル

表 3 解析条件

| 項目          | 内容                |
|-------------|-------------------|
| 境界条件（壁）     | 完全反射              |
| 境界条件（入口音源）  | 入口からもマフラーの音源を与える。 |
| 音源（パンチング周囲） | 四重極音源             |
| 最大メッシュ幅     | 10mm              |
| メッシュ数（節点数）  | 500,000 節点        |
| メッシュ数（要素数）  | 4,000,000 要素      |
| 処理時間/周波数    | 約 10 分            |



#### 4.5.2. 解析結果

次に、解析結果を示す。ここでは、流体解析を音源として、音響解析で求めることができた500Hzおよび2kHzの音圧レベルをコンタに表示している。ここでは、最大メッシュ幅を10mm程度としたため、最大で解析可能な周波数は、3kHz程度と考えられる。さらに高い周波数の解析を実施したい場合には、メッシュを再作成する必要があることに注意する。

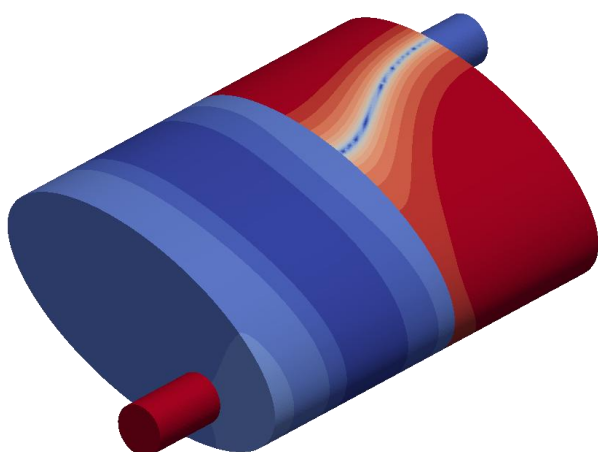


図 5 500Hz 音圧レベル (全体図)

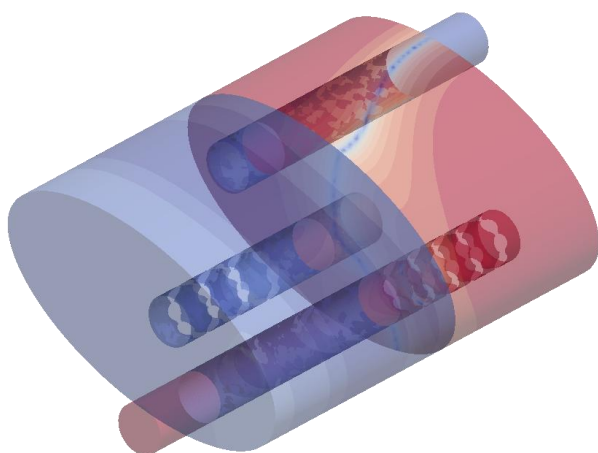


図 6 500Hz 音圧レベル (透視図)

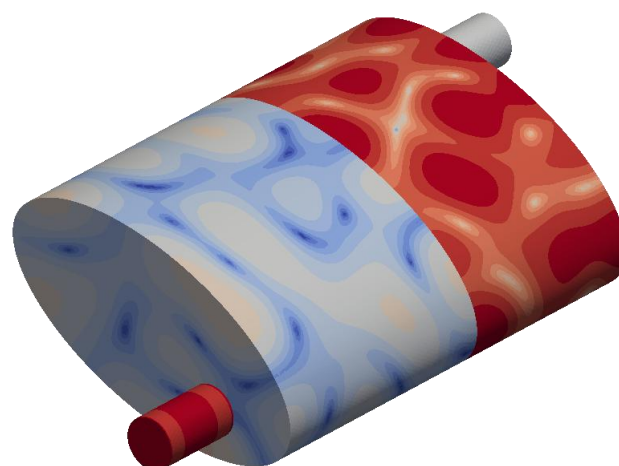


図 7 2kHz 音圧レベル (全体図)

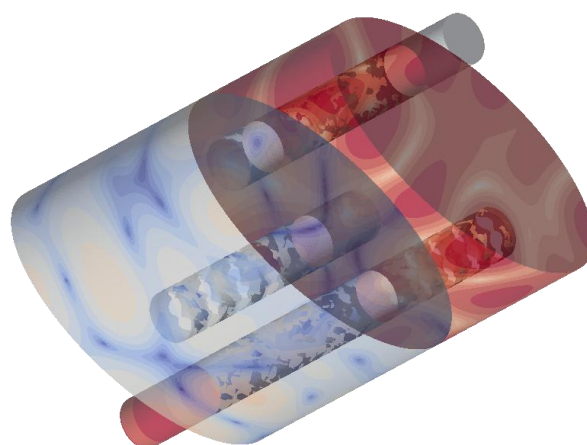


図 8 2kHz 音圧レベル (透視図)

### 5. 構造音響連成解析

#### 5.1. 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。

## 5.2. 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、

$$\begin{aligned} V(x,t) &= \text{grad}(\Psi(x,t)) \\ &= \sum_{\nu=1,\infty} \text{grad}(\varphi(x)) e^{-i\alpha t} \end{aligned} \quad (53)$$

一方、速度も時間方向に、Fourier 展開して、

$$V_0(x,t) = \sum_{\nu=1,\infty} v_i(x) e^{-i\alpha t} \quad (54)$$

と表現する。従って、

$$\frac{\partial \varphi(x)}{\partial n} = v_i(x) \quad (55)$$

となる。上記の数学的な表現で記述すると、

$$\alpha(x)=0, \beta(x)=1, f(x)=v_i(x) \quad (56)$$

となる。また、変位が与えられている場合には、

$$U_0(x,t) = \sum_{\nu=1,\infty} u_i(x) e^{-i\alpha t} \quad (57)$$

と置いて、

$$V_0(x,t) = \frac{\partial U_0(x,t)}{\partial t} = \sum_{\nu=1,\infty} (-i\omega u_i(x)) e^{-i\alpha t} \quad (58)$$

より、

$$v_i(x) = -i\omega u_i(x) \quad (59)$$

となる。また、加速度が与えられている場合には、

$$A_0(x,t) = \sum_{\nu=1,\infty} a_i(x) e^{-i\alpha t} \quad (60)$$

と置いて、

$$v_i(x) = -\frac{1}{i\omega} a_i(x) \quad (61)$$

となる。

## 5.3. 解析手順

本連成ツールは、当社の構造解析ソフトウェアとの連成でも利用可能であるが、より汎用的に作成されており、一般的 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である。提供するツールは、次の 4 つのツールである。

まず、Advance/FrontNoise の境界面情報を NASTRAN 形式に変換する。音響メッシュの情報を利用して、Advance/FrontNoise の境界面情報を NASTRAN 形式に変換する。この形式のファイルには、ヘッダ「GRID」による座標データ、および「CTRIA3」による三角形の面情報が含まれている。

次に、構造解析のメッシュと境界条件から、音響の境界にマッピングし、音響の境界条件を作成する。構造解析のメッシュと境界条件から、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。コマンドは、実行するディレクトリにある条件ファイルに記述された条件に基づき、マッピングの処理を行う。

そのあとで、境界条件を、Advance/FrontNoise の境界条件に変換する。マッパーで出力された構造解析結果をマッピングされた NASTRAN 形式ファイルの音響境界条件を、Advance/FrontNoise の境界条件 (bcs 形式および bcv 形式) に変換する。

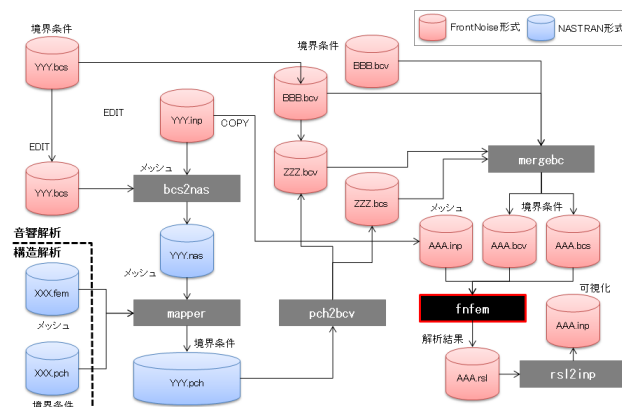


図 9 構造音響連成のデータの流れ

最後に、Advance/FrontNoise の複数の境界条件を 1 つにまとめる。音響の境界条件は、マッピングする境界条件ですべてではない。一方、マッピングツールで作成された境界条件は、マッピングされた境界条件の情報のみが含まれている。従って、「マッピングして作成された境界条件」と「マッピングに無関係に作成された境界条件」を Advance/FrontNoise の境界条件ファイルとして統合するために、本コマンドを利用する。本コマ

ンドでは、2つの境界条件 A と境界条件 B を統合して、境界条件 C を作成する。それぞれの境界条件には、各面グループの周波数毎の条件が記述されている。しかし、境界条件 A と境界条件 B とは、必ずしも同じ周波数で記述されているとは限らない。本コマンドでは、境界条件 A の周波数に境界条件 B を合わせて (B の値を A の周波数に補間する)、境界条件 C として出力される。本コマンドは、さらに一般に、マッピングとは関係なしに、複数の境界条件を 1 つにまとめることに利用可能である。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。

これらのツールは他の解析と同様に大規模解析での利用を想定しており、数百万節点程度のデータに関しても、数十分で処理を終了するレベルである。

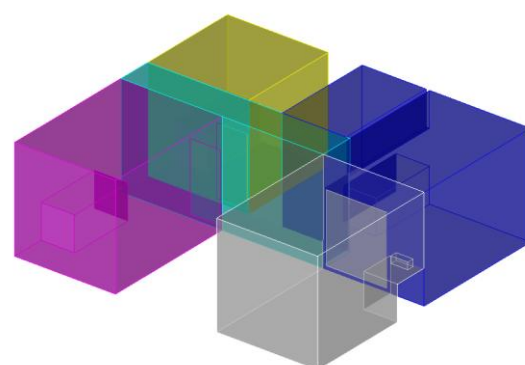


図 10 解析モデル

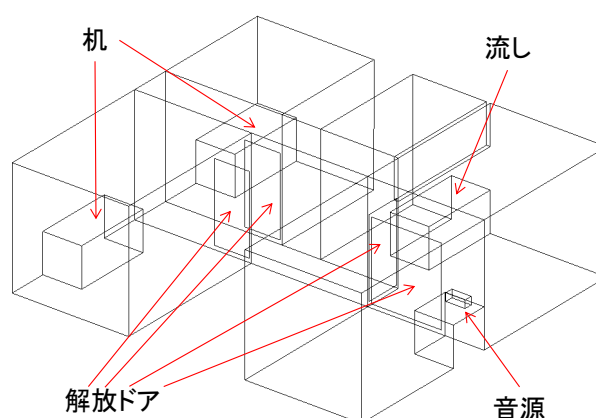


図 11 解析条件

## 5.4. 構造音響連成解析の事例

### 5.4.1. 解析モデル

構造音響解析の事例として、室内に振動する構造物（30cm×10cm×10cm の小さな箱）を机に置いたケースを想定した解析を実施した。目的は、構造物の振動が居室内に及ぼす騒音の影響を確認することである。この小さな箱については、構造解析ソフトで振動を求める計算を実施し、その結果を音響解析に利用するように設定した。室内の条件については、2 ケースの条件を適用した。1 つめは床を完全反射としたモデルであり、2 つめは床を完全吸収としたモデルである。また、2 つのケースとも共通に、室内に、壁、扉、台所、机、台等が設置されている。

### 5.4.2. 解析ケース

ここでは 2 ケースの解析について報告する。その 1 つは完全反射の床であり（ケース 1）、もう 1 つは完全吸収の絨毯（ケース 2）を想定して解析を行った。それぞれ、音響的には両極端なケースでの解析を実施したことになる。

表 4 解析ケースの条件

| ケース名  | 音源   | 床    | 壁    |
|-------|------|------|------|
| ケース 1 | 構造解析 | 完全反射 | 完全反射 |
| ケース 2 | 構造解析 | 完全吸収 | 完全反射 |

### 5.4.3. 解析結果

ケース 1 とケース 2 の結果を示す。

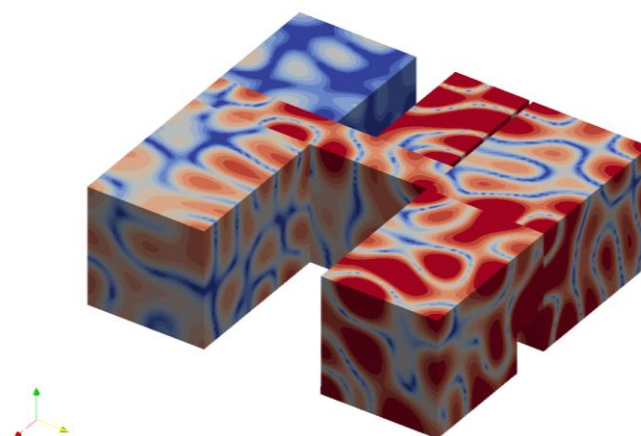


図 12 ケース 1（床反射）の音圧レベル

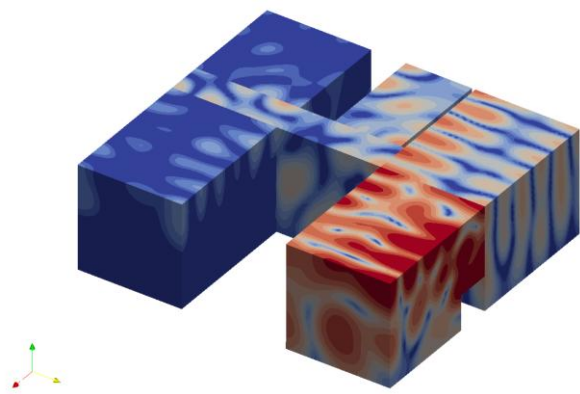


図 13 ケース 2（床吸収）の音圧レベル

## 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。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] 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)
- [2] 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)
- [3] 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”, Vol.10(2011.12)
- [4] 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)

- [5] 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 “, Vol.9 (2011.10)
- [6] 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—”, Vol.13 (2012.10)
- [7] P.M.Morse, K.U.Ingard, "Theoretical Acoustics", Princeton University Press (1986)
- [8] H.S.Howe, "Theory of Vortex Sound", Cambridge University Press(2003)
- [9] 鈴木 昭次, 西村 正治ら, “機械音響工学”, コロナ社, (2004)
- [10] インテル® マス ・カーネル・ライブラリー リファレンス・マニュアル, 資料番号: 630813-023J
- [11] C.A.Wagner, T.Huttl, P.Sagaut, "Large -Eddy Simulation for Acoustics", Cambridge University Press(2004)
- [12] G.R.Liu, "Mesh Free Methods — Moving beyond the Finite Element Method—", CRC Press(2003)