

ハンズオンセミナーを題材とした音響解析入門

尾川 慎介* 徳永 健一* 松原 聖**

Tutorial for Acoustic Simulation by Advance/FrontNoise

Sinsuke Ogawa*, ken-ichi Tokunaga* and Kiyoshi Matsubara**

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise[1][2][3]は、有限要素法により周波数領域および時間領域の音響解析を行うソフトウェアである。専用プリポスト Advance/REVOCAP を利用することで、メッシュを作成し、境界条件・物性等を設定し、解析・可視化まで一体化して利用することが可能である。

アドバンスソフトでは、Advance/FrontNoise をお客さまに体験いただくためのセミナー（ハンズオンセミナーと呼んでいる）を実施している。Advance/FrontNoise ユーザの方へのチュートリアル資料の提供、Advance/FrontNoise 導入を検討中のお客さま向けにソフトウェアの利用方法に関する情報を提供すること、および、今後音響解析を手掛ける可能性のある方への情報提供を目的として、ハンズオンセミナーを題材とした音響解析入門について本稿で紹介する。

Key word: 音響解析、有限要素法、音源、大規模解析、周波数領域、時間領域、

1. はじめに

1.1. 実施したセミナー

2016 年 5 月 11 日に公益財団法人計算科学振興財団様[4]（以下、FOCUS 様）のセミナー室において、FOCUS スパコンを利用して、当社が主催の「音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise FOCUS スパコンを使ったハンズオンセミナー」



図 1 ハンズオンセミナーの風景

を実施した。本セミナーには、民間企業等 12 名のお客さまに参加いただいた。

本稿で紹介する内容のベースとなったハンズオンセミナーでは、FOCUS 様のセミナー室での PC 上においてプリポスト Advance/REVOCAP を利用してメッシュ作成および解析条件と境界条件を設定し、作成したデータを FOCUS スパコンに転送し、そのスーパーコンピュータ上で当社の音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise を実行した。実行結果は PC に転送し再度 Advance/REVOCAP で可視化した。このセミナーでは、お客さまに FOCUS スパコン上での手軽な Advance/FrontNoise での大規模解析を体験していただくことをひとつの目的として実施した。当日は、Advance/REVOCAP を利用して大規模計算のためのメッシュ作成が比較的手軽にできることを体験していただくとともに、最大規模では 1 億要素の解析を FOCUS スパコンの 32 ノードを利用して 192 並列で実行することを体験していただいた。

1.2. 本稿の構成

本稿では、内部音響問題である消音器を解析対象として Advance/FrontNoise の周波数領域の計算機

*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 代表取締役社長
President, AdvanceSoft Corporation

能の利用方法を示す。内容は、2 節では基本的な操作方法、3 節では 2 節のデータを利用して大規模解析を行う方法について述べる。

まず、2 章では、内部音響問題の基本的なケースとして、伝達関数法等で解析解を求めることができる事例である消音器の解析を実施する。ここでは、CAD データで与えられた形状に対して、メッシュ作成と解析条件の設定を音響解析のプリポスト Advance/REVOCAP で行う。作成したデータに対して、いくつかの周波数でスウィープさせた音響解析を行う。その解析結果については入り口と出口の音圧の比を解析解と比較することで、解析結果の正しさ確認する。また、プリポスト Advance/REVOCAP では、任意の周波数の結果に対して、音圧・音圧レベル・粒子速度等の可視化を行うことができ、また、任意の断面の物理量も可視化することができる。ここでは、その方法についても確認する。

次に、3 節では、大規模問題の解析方法について述べる。ここでは 2 節の課題として実行した消音器の解析をベースとした大規模問題を取り扱う。大規模メッシュの作成は、本ソフトウェアに標準装備されているメッシュ細分化ツールである refine を利用する。本ツールでは、1 回の細分化でメッシュ幅は半分となり、メッシュ数は 8 倍となる。これを何回か繰り返すことにより大規模データが作成可能となる。細分化ツール refine が利用可能であることも本ソフトウェアの特徴のひとつである。

最後に 4 章では、セミナー内容のまとめと今後の展望を示した。セミナー当日では、本稿で示す内部音響問題の代表例として消音器の解析を行い、外部音響問題の代表例として列車高架橋からの沿線民家への騒音解析を行った。高架橋の問題では空間スケールが大きいため、数百 Hz 程度の周波数において疑似的な 2 次元解析を行い、現実的な範囲で解析が実行できるようにした。セミナーで行った外部問題の例題については、Advance/ FrontNoise の最新機能で利用可能となった無限要素と合わせ、再度、別の機会で紹介する。本稿では、消音器の例題のみについて説明する。

1.3. 利用するソフトウェアとハードウェア

まず、本書で述べる解析を実施するために必要なソフトウェアは、

- ・ Advance/FrontNoise
- ・ Advance/REVOCAP for FrontNoise

である。その他にグラフを作成するために PC 上のグラフツールを利用する必要がある。必要なソフトウェアは以上の 3 つのみである。ハンズオンセミナーにおいては、上記 2 つのソフトウェアとフリーのグラフ描画ソフトを利用した。

Advance/REVOCAP は PC で動作する Windows 上のソフトウェアであり、Advance/FrontNoise を実行するためのハードウェアとしては MPI 環境のある Linux の並列計算機が必要である。音響解析を実施するためにセミナーで利用した FOCUS スパコンは下記の性能の計算機である。

表 1 FOCUS スパコン性能 ([4]から抜粋)

	ノード数	理論演算性能 (GFlops)	コア数	メモリ (GB)
Aシステム	224	108	12	48
Bシステム	2	119	16	512
Cシステム	22	108	12	48
Dシステム	80	400	20	64
Eシステム	48	400 +4044	20 +240	128
Fシステム	12	1152	40	128
Gシステム	4	240 +1011	12 +60	64
Hシステム	68	205	8	64

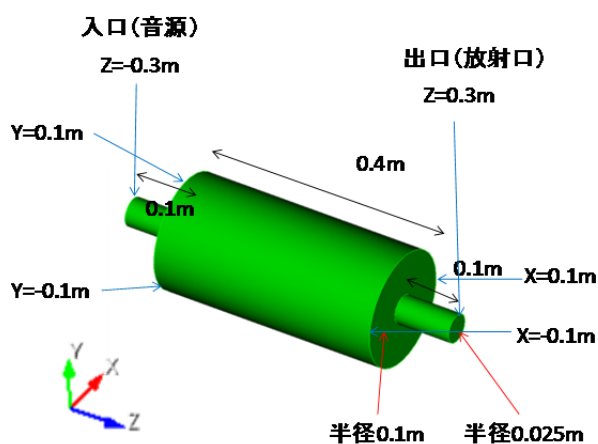
FOCUS スパコンでは、当日の利用可能な計算機の状況から A システムを利用した。A システムは最大ノード数が 224 ノードであり、必要に応じた数千程度の高い並列計算が可能である。ただし、大きな計算機資源を占有するためには特別な申請が必要であることを付け加えておく。セミナー

当日では、特別な申請が必要のない範囲の計算規模を設定し、最大 32 ノードを利用した。

2. 消音器の解析

2.1. 解析対象

ここでは、単純形状のマフラーの性能解析を行う。解析形状は図 3 に示すように胴体が半径 0.1m で長さが 0.4m、入り口出口は半径 0.025m のマフラーである。この消音器の性能は、出入り口の半径、胴体の長さで決定され、理論的に求めることができる。



形状の中心を座標の原点としました

図 2 解析形状

ただし、理論的に求める場合の仮定として、管路を 1 次元として取り扱うという条件がある。すなわち、対象とする周波数の波長が最も太い部分の直径程度になると、この仮定を満たさなくなる。この管の胴体は 0.2m 程度であるため、音速を 344m/sec とすると 1kHz での波長は 0.344m である。従って、1kHz を大幅に超える周波数においては、理論解では実験の解と乖離することが予測される。また、同様に理論解と 3 次元シミュレーションの解も一致しなくなる。この場合はシミュレーションに問題があるのではなく、1 次元の理論解の適用限界であることが理由であることも付け加えておく。

解析条件としては、マフラーの入口の面に 1[Pa] の音圧を与える。また、簡単のためマフラー内壁は完全反射とする。まずは、マフラー出口は透過（完全吸収）条件とするが、後半ではより現実的

な境界条件を設定できることを説明する。

ここまでの準備が完了したら、準備計算では 100Hz から 2kHz まで 100Hz ごとの計算を行い、メッシュの生成・境界条件の貼り付け・解析条件等に問題ないかどうかを確認する。その後、本計算を行い 10Hz から 2kHz まで 10Hz ごとに計算を行う。

最後に、解析結果から出口の音圧を求め、入口の音圧との比を求め、この値を 1 次元の理論解と比較する。ただし、ここで、シミュレーションで求める解は 3 次元の結果であり、理論解では 1 次元の結果であることに注意しておく必要がある。

2.2. 理論解

理論的に入口の音圧 P_{in} と出口の位置の音圧 P_{out} の比 P_{out}/P_{in} を求め、この値をリファレンスとする。この値は 1 次元の伝達関数を利用した手法で、周波数ごとに求めることができる。ここでは、入口の面に 1Pa を与えた場合の出口の音圧を求めるが、ここで実施する音響解析は線形解析であるため、入り口の面に与える音圧とは無関係に比 P_{out}/P_{in} を求めるとが可能であることに注意しておく。

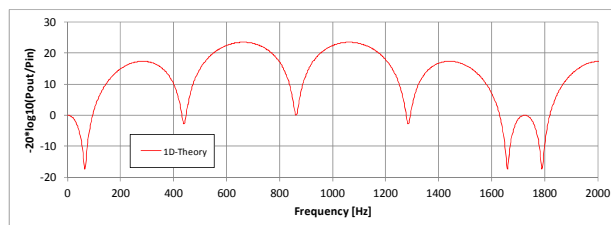


図 3 P_{out}/P_{in} の理論解

具体的には、管路を 1 次元として取り扱う場合の理論解を求めるためには、次のような手順で求める。一様な断面積 S の長さ L の管路の入り口の音圧と体積速度をそれぞれ P_1 と U_1 とし、出口の音圧と体積速度をそれぞれ P_2 と U_2 とする。このとき、管のインピーダンスは、

$$Z_c = \frac{i\omega\rho}{\gamma S} \quad (1)$$

となる。ここで複素伝播係数 γ は、

$$\gamma = ik \quad (2)$$

である。管の中の一様な流れのマッハ数を M とすると、入口と出口の量の関係は、

$$\begin{pmatrix} P_2 \\ U_2 \end{pmatrix} = T^{(2,1)} \begin{pmatrix} P_1 \\ U_1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$T^{(2,1)} = \exp(-aM) T' \quad (4)$$

$$T' = \begin{pmatrix} \cosh a & Z_C \sinh a \\ \frac{1}{Z_C} \sinh a & \cosh a \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$a = \frac{\gamma L}{1 - M^2} \quad (6)$$

となる。ここで、記号を下図の通りとする。ここで未知数は P_i と U_i で $i=1,2,3,4$ なので、8 つある。

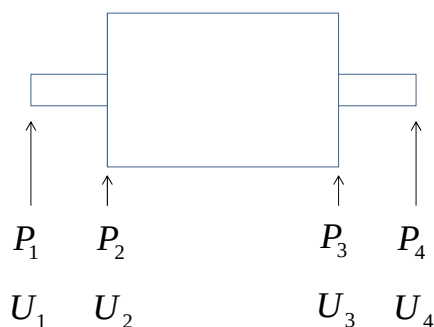


図 4 音圧と粒子速度の定義

この 8 つの変数に対して、3 組の

$$\begin{pmatrix} P_{i+1} \\ U_{i+1} \end{pmatrix} = T^{(i+1,i)} \begin{pmatrix} P_i \\ U_i \end{pmatrix}, \quad i=1,2,3 \quad (7)$$

が成立するすなわち、6 この関係式が得られる。

また、境界条件として、

$$P_1 = 1 \quad (8)$$

$$\frac{P_4}{U_4} = \rho c \quad (9)$$

を与える。前者の境界条件は、入り口で例えばスピーカ加振することに相当する。後者については、透過境界（吸収境界）であるとして、音響インピーダンスが ρc である条件を与える。従って、8 つの未知数で 8 つの関係式があることになり、これらの値を求めることができる。具体的には、出口のインピーダンスの ρc 値から、行列の関係式を利用して

$$\frac{P_4}{U_4} \rightarrow \frac{P_3}{U_3} \rightarrow \frac{P_2}{U_2} \rightarrow \frac{P_1}{U_1} \quad (10)$$

を次々に求めることができる。最後に $\frac{P_1}{U_1}$ を求め

ることができれば、境界条件 $P_1 = 1$ から U_1 を求めることができる。ここから順番に

$$P_i, U_i \quad i=2,3,4 \quad (11)$$

を求めることができる。最後に

$$P_1 = P_{in}, \quad P_4 = P_{out} \quad (12)$$

であるため、これらの手順から P_{out}/P_{in} を求めることができる。これらの計算は、すべて表計算ソフトで可能である。ただし、ここに示した物理量はすべて複素数であるため、複素数が利用可能な表計算ソフトで計算する必要がある。参考までに、その場合に、各場所の断面積 S や長さ L を変数にしておけば、いろいろなケースの透過損失のグラフ（横軸は周波数）を求めることができる。ただし、高周波では適用範囲内にあるかどうかの注意が必要である。

表 2 メッシュ幅の基準

周波数 [Hz]	波長 [m]	推奨 ΔX [m]
200	1.650	0.206
400	0.825	0.103
600	0.550	0.069
800	0.413	0.052
1000	0.330	0.041
1200	0.275	0.034
1400	0.236	0.029
1600	0.206	0.026
1800	0.183	0.023
2000	0.165	0.021

2.3. メッシュ作成

Advance/REVOCAP でメッシュを作成する。本ソフトウェアはテトラソルバーである。四面体一次要素で格子データを作成する。本ソフトウェアをテトラソルバーとした理由は、複雑な形状も対応できること、および、複雑形状に対しても、メッシュを作成することができるという理由から

である。また、四面体メッシュでは、メッシュのアスペクト比が悪くなる等のメッシュの品質が心配であるが、かなりメッシュがつぶれても計算精度には問題ないことを[2]に示した。ただし、線形ソルバーに反復法を利用した場合には、メッシュがつぶれていると収束が遅くなるという欠点があることが分かっている。

データの作成が完了したのちに、FrontNoise 形式で export し、Advance/FrontNoise の入力データとする。他のメッシュから export されたメッシュデータも利用できる形式があり、FrontNoise 形式に変換することが可能である。音響解析においては、着目する周波数によりメッシュ幅を決定する必要がある。

ここでは解析を行う最大周波数が、2kHz 程度のケースを想定しており、ひとつのメッシュの大きさは 0.015m 程度とした。メッシュはオートメッシュで作成するが、Advance/FrontNoise 専用のプリポストとなっているため、他社のソフトウェアと比較して非常に親和性が高い。下記に、周波数とメッシュ幅の目安を設定する。

以上で説明した消音壁の解析について、解析モデルの作成および可視化を Advance/REVOCAP で行う方法を説明する。

解析対象となる単純形状のマフラーはハンズオンセミナーではあらかじめ CAD データファイルとして準備した。ここではその形状ファイル muf01.step を読み込んでメッシュ生成を行う。

- ① Advance/REVOCAP を起動して、File メニューから Import CAD を選択して、muf01.step を読み込む。

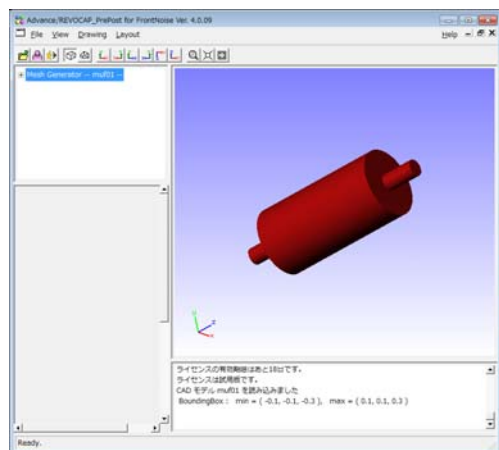


図 5 CAD データ読み込み

- ② 四面体自動メッシュ生成を行うため TetMesh のメニューを開く。
- ③ 2000Hz まで計算することを考慮して基準長さ（四面体要素の辺の標準的な長さ）を 0.015 として、メッシュ生成ボタンを押す。

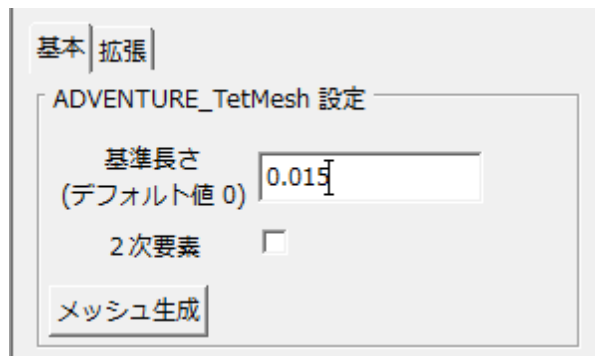


図 6 メッシュ幅の設定

- ④ メッシュ生成が完了すると、生成されたメッシュが表示される。

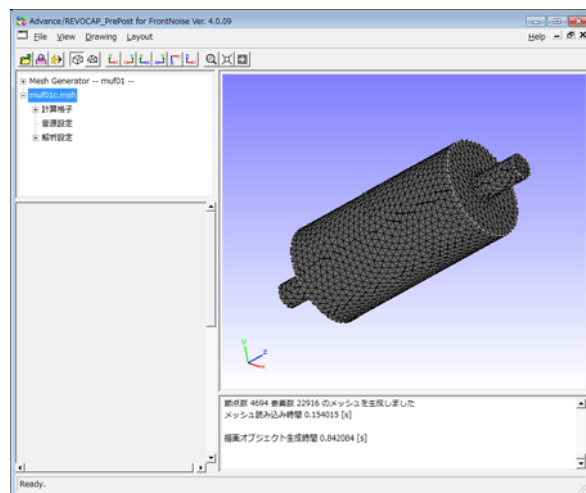


図 7 メッシュの表示

2.4. 境界条件の設定

Advance/FrontNoise の周波数領域での一般的な境界条件は

$$\alpha(x)\phi(x) + \beta(x)\frac{\partial\phi(x)}{\partial n} = f(x) \quad (13)$$

で与えることができる。この係数を変更することで、多くの種類の境界条件を設定することが可能である。表 1 に設定可能な境界条件の一覧を示す。この導出の方法については[2]を参照いただきたい。多くの式を掲載しているが、これらのすべての条件は、本ソフトウェアで基本変数としている

音響速度ポテンシャルと音圧および粒子速度の関係である

$$p(x) = i\omega\rho\phi(x) \quad (14)$$

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

をもとにして変形した式である。

表 3 境界条件一覧

境界条件	$\alpha(x)$	$\beta(x)$	$f(x)$
音圧	$i\omega\rho$	0	$-p_i(x)$
粒子速度	0	1	$v_i(x)$
粒子変位・加速度	0	1	$-i\omega u_i(x), -\frac{1}{i\omega}a_i(x)$
インピーダンス	$i\omega\rho$	$-Z$	0
完全反射	0	1	0
完全吸収(無反射)	$i\omega\rho$	ρc	0

まず、本例題では、入口は音圧の境界としていたため、

$$i\omega\rho\phi(x) = p_0(x) \quad (16)$$

を用いる。簡略にして

$$i\omega\phi(x) = \frac{p_0(x)}{\rho} \quad (17)$$

となる。出口は ρc 境界（インピーダンスを ρc にする。吸収境界=無反射）とするために

$$i\omega\rho\phi(x) + \rho c \frac{\partial\phi(x)}{\partial n} = 0 \quad (18)$$

$$i\omega\phi(x) + c \frac{\partial\phi(x)}{\partial n} = 0 \quad (19)$$

として設定する。なお、ここに述べたインピーダンスを与える方法と同様の手法で、完全反射ではない場合の吸音率を与えることができる。利用する式は、

$$i\omega\rho\phi(x) + Z \frac{\partial\phi(x)}{\partial n} = 0 \quad (20)$$

である。吸音率 α 、インピーダンス Z 、および、反射率 R の関係は次の通りである。

$$\alpha = 1 - R \quad (21)$$

$$R = \frac{Z - \rho c}{Z + \rho c} \quad (22)$$

の関係がある。インピーダンスが無限大の場合は

完全反射であり、インピーダンスの式で Z を無限大に与えることは

$$\frac{\partial\phi(x)}{\partial n} = 0 \quad (23)$$

に相当している。

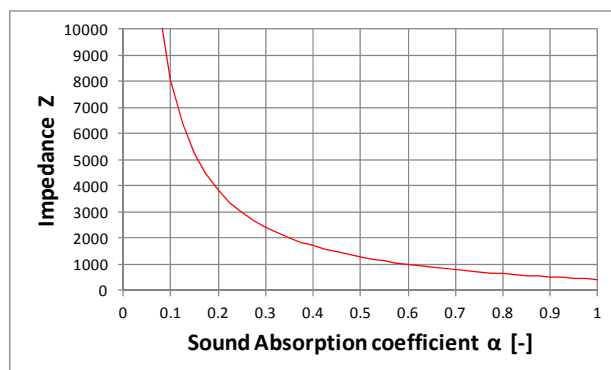


図 8 吸音率とインピーダンスの関係

次に、Advance/REVOCAP での操作方法について述べる。境界条件はメッシュの境界面それぞれについて与える。デフォルトで完全反射の境界条件が適用されるので、それ以外の条件を与える面についての設定を行う。ここでは入口に音圧、出口に完全吸収（無反射）境界条件を与える。

- ① Advance/REVOCAP の 3DView 画面でメッシュの入口の面（ Z 座標の小さい方）をマウスで選択する。選択された面は色が変わる。

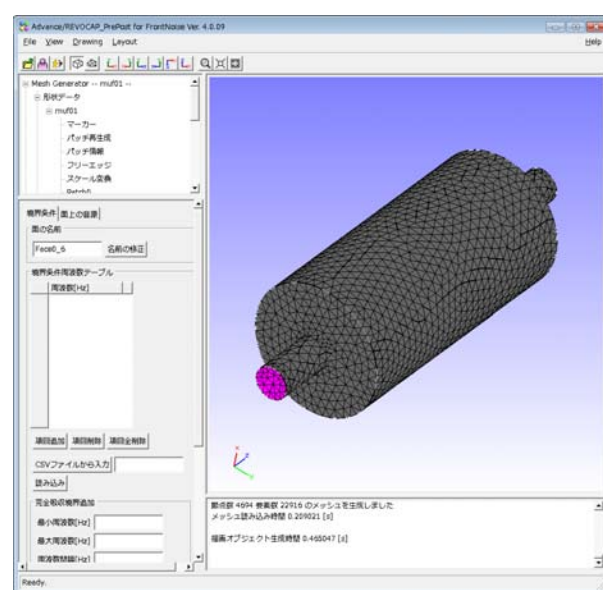


図 9 メッシュにおける境界条件の選択

- ② 面が選択されると左下に境界条件の周波数テーブルの入力画面が現れるので、ここでは音圧を与える周波数 10,100,1000,10000 を追加する。
- ③ 境界条件は α 、 β 、 f の値を周波数ごとに与えることになる。確認、編集ボタンを押してそれぞれの値を入力する。

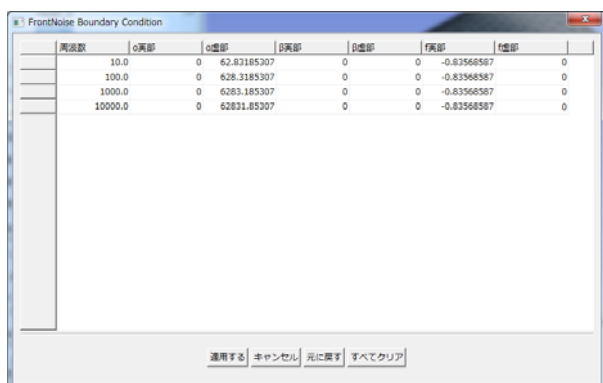


図 10 境界条件の指定

- ④ 出口の面についても同様にマウスで選択する。

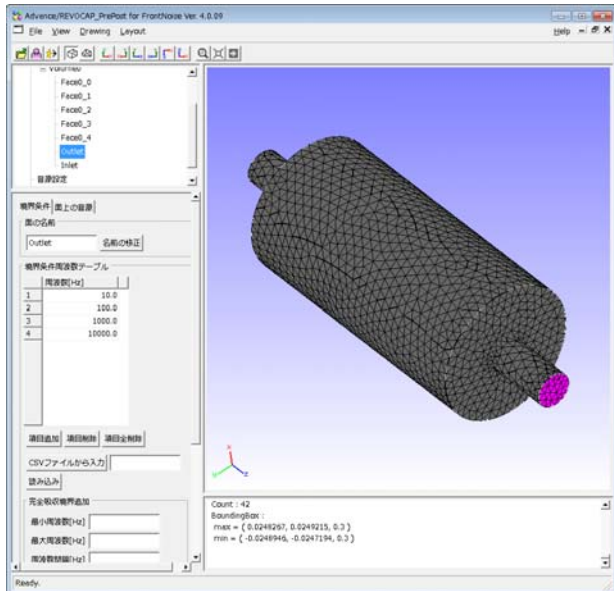


図 11 出口の選択

- ⑤ 周波数テーブルに 10,100,1000,10000 を追加する。
- ⑥ α 、 β 、 f の値の確認編集ボタンを押して、数値を入力する。

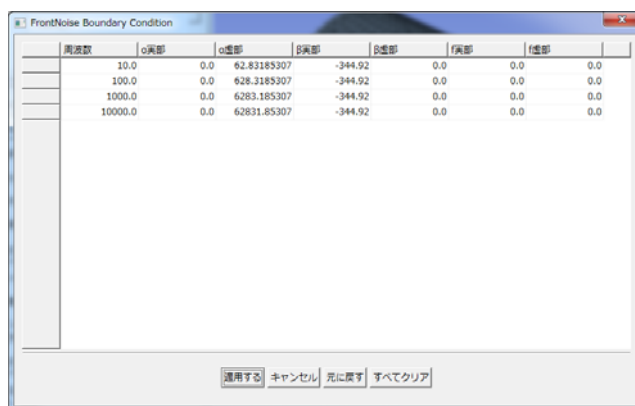


図 12 境界条件の入力

入口境界条件のテーブルの値は以下の通りである。表に記載されていない値はすべて 0 である。

表 4 境界条件の値 (入口)

周波数	α 虚部	f 実部
10	62.83185307	-0.83568587
100	628.3185307	-0.83568587
1000	6283.185307	-0.83568587
10000	62831.85307	-0.83568587

出口境界条件のテーブルの値は以下の通りである。表に記載されていない値はすべて 0 である。

表 5 境界条件の値 (出口)

周波数	α 虚部	β 実部
10	62.83185307	-344.92
100	628.3185307	-344.92
1000	6283.185307	-344.92
10000	62831.85307	-344.92

これらの表はあらかじめ表計算ソフトで csv 形式として作成しておいて、それを利用することもできる。

2.5. 解析条件の設定

本解析では、理論解と一致するかどうかを確認することを目的とする。まず、準備計算では何点かの周波数で結果を得ることでデータの確認をする。次に、本計算で多くの周波数を計算する手順とする。まず試計算では、100Hz から 2kHz まで 100Hz ごとに 20 点の周波数での試計算を行う。

計算対象の周波数、線形ソルバーの最大反復回

数などの設定を行う。Advance/REVOCAP からは画面左上のツリービューの「解析設定」を選んでパラメータの設定を行う。

- ① 「解析設定」の項目からケース名と最大反復回数を設定する。

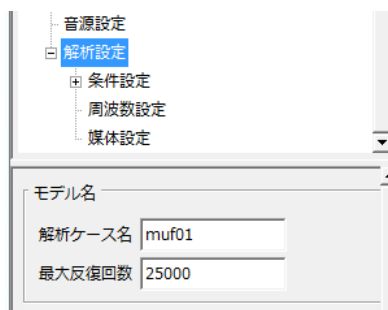


図 13 最大反復回数の設定

- ② 「周波数設定」の項目から、開始周波数、終了周波数、計算する周波数間隔を設定する。

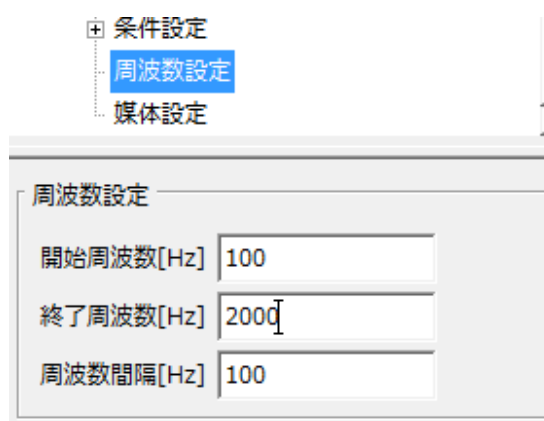


図 14 周波数の設定

- ③ 「媒体設定」の項目から、音速と密度を設定する。



図 15 媒体の設定

これで Advance/REVOCAP による設定は完了である。File メニューから Save Model を選択して解析モデルを保存する。

2.6. 準備計算の実行

解析モデルを計算サーバーに転送し、図 16 で示したようなジョブスクリプトを実行する。図中でここでは、「・・・」で示したが、この場所には計算を実行するためのジョブシステム固有の記述をしなければならない。この部分については、システム管理者からの情報をもとに記述しなければならない。そのあとの 2 行には、本ソフトウェア固有の実行コマンドである。まず、**export** で環境変数の設定を行い、ここでは小規模解析のため、直接法を利用している。その次の行には、**mpirun** コマンドを利用して 8 並列で本ソフトウェアを実行している。

```

・・・
export FNFEM_SOLVER=80          直接法を利用する
mpirun -np 8 fnfem < muf01.dat  FrontNoise 実行
・・・

```

図 16 解析実行のジョブスクリプト

正しく実行できた場合には、次のような標準出力が行われる。ここでは、まず、プログラム名が出力され、その後にケース名、利用するファイル名が出力される。引き続いて、音速、密度、解析する周波数等の情報が出力される。その後に獻獻条件に対応する情報が出力される。

そのあとで、周波数ごとの計算を行う。すべての周波数の計算が終了した時点で処理時間の情報が出力されて解析が終了する。

正しく実行できた場合には、結果のまとめ方について記述する。解析結果編集の代表的な 2 つの手順を示す。解析で出力されるファイル名

muf01-r0006-00700.rsl

は、「ケース名」+「ステップ番号」+「周波数」の命名規則となっている。一般的には、この結果から次の 2 通りのパターンで結果を抽出することになる。


```

Advance/FrontNoise/FEM/MPI Ver4.3
April 30, 2014

< file information >
- FEM grid file .....: muf01.inp
- boundary surface file .....: muf01.bcs
- boundary surface value file ....: muf01.bcv
- boundary node file .....: muf01.bcn
- boundary node value file .....: muf01.bcq
- header of result file .....: muf01-r***.rsl

< analysis conditions >
- sound velocity[m/sec] .....: 3.449E+02
- density[kg/m3] .....: 1.197E+00
- freq[Hz] (start) .....: 1.000E+02
- freq[Hz] (terminate) .....: 2.000E+03
- freq[Hz] (interval) .....: 1.000E+02
- number of nodes .....: 5337
- number of elements .....: 26785
- number of processors .....: 1
- iterative method .....: DIRECT
- pre condition method .....: DIRECT
- # restart for gmres .....: 30

< boundary conditions >
- number of surface group .....: 2
- number of surface .....: 36
- number of surf. freq. table ...: 6
- number of point sources .....: 0
- number of pt-src. freq. tab. ..: 6

```

図 17 標準出力 (その 1)

```

* start of frequency domain *

( 1) frequency 100.00 [Hz]

* frequency[Hz] = 100.00
* number of iter. = 0
* rel.tol. (||Ax-b||/||Ax||) = 1.000E+20 ( 1.000E-08)
* abs.tol. (||Ax-b||) = 1.000E+20 ( 1.000E+20)

( 2) frequency 200.00 [Hz]

**** ACCOUNTING TABLE OF THE CPU-TIME ****



| PROCESS                   | TOTAL TIME        |
|---------------------------|-------------------|
| < 1> Total Time           | : 7.43D+00(100.0) |
| < 2> Input                | : 7.89D-02( 1.1)  |
| < 3> Time Loop (pre)      | : 1.67D+00( 22.4) |
| < 4> Linear Solver (pre)  | : 1.18D-02( 0.2)  |
| < 5> Linear Solver        | : 5.33D+00( 71.7) |
| < 6> Linear Solver (post) | : 1.82D-03( 0.0)  |
| < 7> Time Loop (output)   | : 3.44D-01( 4.6)  |
| < 8> Post Process         | : 1.00D-04( 0.0)  |



normally terminated

```

図 18 標準出力 (その 2)

まず、①結果ファイル群から、指定座標結果の取り出し、出口 1 点(x,y,z)= (0.0, 0.0, 0.3) の結果を取り出す。その結果をファイルに出力する。このコマンドは

```
ls *.rsl | getnvalbin 0 0 0.3 muf01.inp > o1.csv
```

である。ここでは、拡張子に「rsl」ファイルをすべて出力し、そのファイル名を getnvalbin というコマンドに入力している。これが複数周波数結果ファイルから数値を抜きだして横軸周波数に、縦軸を指定の物理量にしたグラフを作成することができる。

次に、②結果ファイルを可視化ファイルに変換する方法を示す。結果ファイルのひとつを REVOCAP や ParaView で可視化可能なファイルに変換する。例えば 1000Hz の結果を「・・・」という名称のファイルに変換する場合には、
rsl2inp muf01.inp muf01-r0009-01000.rsl out1000.inp
とする。

下記のグラフは、これらの処理を行い、グラフツールで表示した結果である。準備計算で 20 点のみを計算した結果である。次の節では、解析周波数の間隔を小さくして理論解とシミュレーション結果とを比較する。

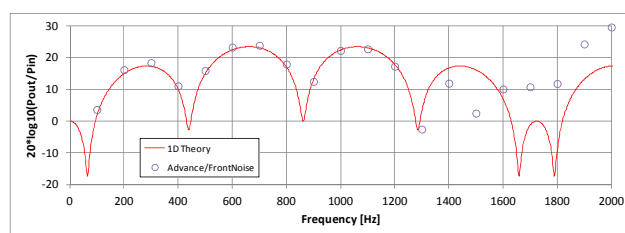


図 19 解析結果

2.7. 本計算の実行

次に、準備計算と同じ手法で、解析条件のみを利用して、解析条件のみを変更して、10Hz ごとの解析を行う。ここでは、制御データ*.dat を変更するのみでこの解析を実行することができる。ここでは、10Hz ごとに 2kHz まで、200 点の周波数の計算を行った。

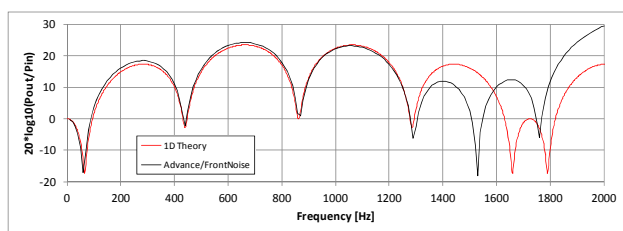


図 20 解析結果

2.8. 後処理と可視化

Advance/FrontNoise を実行すると計算結果ファイルは Advance/FrontNoise 独自の形式で出力される。今回の解析では例えば `muf01-r0006-00700.rsl` のようなファイルが出力されるが、これは、「ケース名」+「ステップ番号」+「周波数」の命名規則となっている。これらのファイルから図 19 のようなグラフを作成するためのデータや図 22 のような可視化のためのデータを作成することができる。グラフ作成のための変換は、付属のツール `getnvalbin`、可視化用のファイルへの変換は付属のツール `rsl2inp` を用いて行う。

Advance/REVOCAP からは `rsl2inp` で変換した UCD 形式のファイルを読み込んで可視化することができる。

- ① File メニューから Open Result を選択して、`rsl2inp` を使って変換したファイルを開く。
- ② 右側の 3DView にメッシュが表示される。
- ③ 左上のツリービューから Contour を選択し、可視化したい項目を Item から選択して、設定ボタンを押す。コンター表示、カラーバー表示を有効にするためチェックボックスをオンにする。
- ④ 断面を表示するために、ツリービューから Section を選択して、法線ベクトルを y 軸、切断面表示を「断面」にする。

20Hz の計算結果の音圧の虚成分と実成分を断面表示したものを以下に示す。

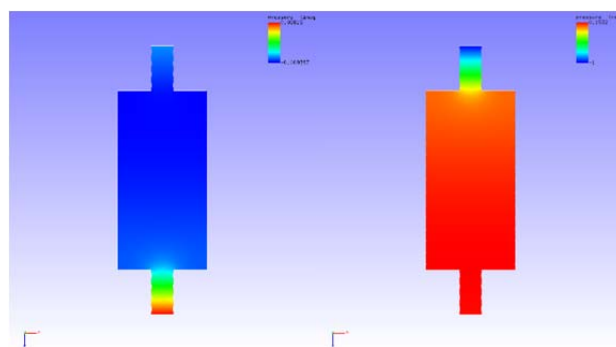


図 21 計算結果音圧断面表示（左:虚成分、右:実成分）

2.9. 結果の考察

この解析結果から、高周波になると 1 次元の理論と解析結果が合わないことが分かる。これは、解析結果が間違っているのではなく、理論解を 1 次元で近似したことは高周波では限界を超えていることが原因である。

1 次元の理論では、波長がダクトの直径よりも十分に長いという仮定である。ここで実施した解析は 3 次元の音響解析であるため、高周波では 1 次元の理論では表現できない部分が現れてきている。1530Hz の波長は 0.16m 程度であり、マフラー胴体の直径 0.2 程度となっており、1 次元近似の限界であることが分かる。このあたりで 1 次元の分布とは異なってくる。それをコンター図で確認することができる。下図では、1 次元の理論解とは異なる部分が確認できる。

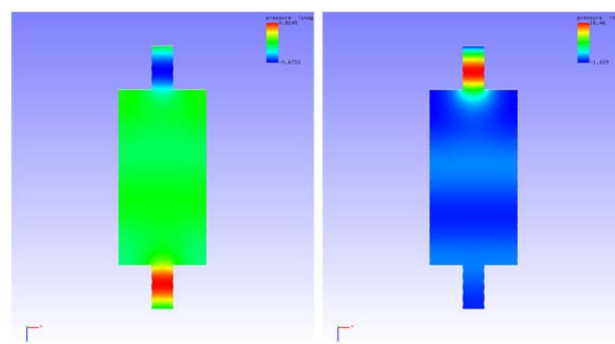


図 22 1530Hz における音響速度ポテンシャル

2.10. 現実的な境界条件

ここまでの解析条件では、出口を音が透過するものとして、出口の音響インピーダンスを ρc と

して与えていた。しかし、現実には出口は音が透過する部分ではなく、ある程度の音響インピーダンスを持つ。出口全体の面に対しては、ダクト開口端の放射インピーダンス Z を与える。

ダクト出口の音響インピーダンスについては古くから理論的に研究されており、例えば参考文献[5]に記述がある。放射インピーダンス Z は、 $J_m(\cdot)$ と $H_m(\cdot)$ をベッセル関数、シュトルーベ関数として、

$$Z = \rho c \zeta_r = \rho c (\theta_r + i \chi_r) \\ = \rho c \left(1 - \frac{J_1(2ka)}{ka} + i \frac{H_1(2ka)}{ka} \right) \quad (24)$$

$$\theta_r \approx \frac{1}{2}(ka)^2, \quad \chi_r \approx \frac{8}{3\pi}ka \quad (25)$$

である。これらの特殊関数は計算コストがかかることがあり、多くは多項式での近似式が利用される。本計算では、後者の $ka < 0.6$ での近似式を利用した。

次に、開口端の放射インピーダンス Z を境界条件として与える方法について説明する。一般的に、物理的に与えられるインピーダンス Z を境界に設定するためには、周波数成分ごとに、

$$Z \frac{\partial \phi(x)}{\partial n} = i \omega \rho \phi(x) \quad (26)$$

が成り立ち、境界条件の表現で記述すると、

$$\alpha(x) = i \omega \rho, \quad \beta(x) = -Z, \quad f(x) = 0 \quad (27)$$

となる。

ここで示したインピーダンスを与えた場合の理論解とシミュレーション結果の比較を示す。もちろんここでも理論解は1次元の伝播を仮定しているため、1kHzを超えたあたりでは、シミュレーション結果と異なる結果となる。

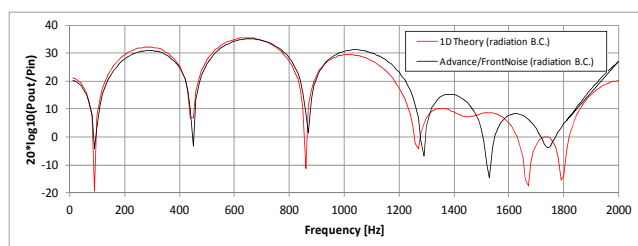


図 23 解析結果

ここで、理論解を求める方法について 2.2 節で示したが、ここでは、出口の音響インピーダンスを上記の放射インピーダンスを与えて計算する必要があることに注意しておく。そのため、両者の理論解が異なっている。

3. 並列計算

3.1. 概要

音響解析では、標本化定理により、メッシュサイズが解析結果に大きな影響を及ぼす。すなわち、高い周波数の解析を粗いメッシュで計算しても正しい解を得ることができない。

しかし、細かいメッシュを使った解析は必然的に大規模になるため、解析規模に応じて並列計算を実施しないと計算時間がかかりすぎるという問題が発生する。また、細かいメッシュを作成する操作そのものにも、一定の計算リソースを必要とする。

そこで、本節では、前述したマフラー（図 3）のモデルと解析条件を利用して、メッシュの細分化の手順と、大規模並列計算の実行例を紹介する。

なお、これらの機能を計算結果の妥当性を評価する目的に利用することも可能である。つまり、あるモデルをあるメッシュサイズ A で計算した結果と、より小さいメッシュサイズ B で計算した結果がほぼ同一であれば、計算コスト削減のために以降の計算はメッシュサイズ A で行うことが望ましい。弊社では経験的に、メッシュサイズを媒質の解析周波数における波長の 1/8 程度にすることを推奨している。

3.2. メッシュの細分化

3.2.1. 細分化の手法

解析周波数に応じたメッシュを作成する手段は、大きく分けて 2 種類ある。

- メッシュサイズごとにメッシュ分割ソフトウェアを利用してメッシュを作成する。
- 粗いメッシュから機械的な操作で細かいメッシュを作成する。

前者は常に最適なメッシュサイズを選択することが可能で、また、メッシュに対する細かいコ

ントロールが可能であるが、一般に、数千万を超えるメッシュの作成には高性能の計算機が必要であり、また、相当の処理時間を必要とする。さらに、作成されたそれぞれのメッシュは原理的には無関係であるため、境界条件の設定を含むプリ処理をそれぞれに対して実行しなければならない場合がある。

後者は、モデルの粗いメッシュを用意して、1つの四面体一次要素をそれぞれの辺の中点で分割して8つの四面体一次要素に変える操作をすべての要素に対して適用することで、メッシュサイズをもとのメッシュの半分にする処理である（図24）。こちらでは前者のような細かいコントロールはできないが、自動化に適した方式であり、また、同じ操作を繰り返し適用することで 1/2, 1/4, 1/8, ... とより細かいメッシュを作成することが可能である。

3.2.2. 細分化ツール “refine”

いずれの手法が効率的かは解析内容やワークフローによって変化しうが、Advance/FrontNoise には後者の機能を実現するためのツール “refine” を同梱している。このツールでは粗いメッシュの節点番号は維持され、面グループの情報はツールと一緒に更新されるため、それぞれに対する境界条件を変更する必要はない。

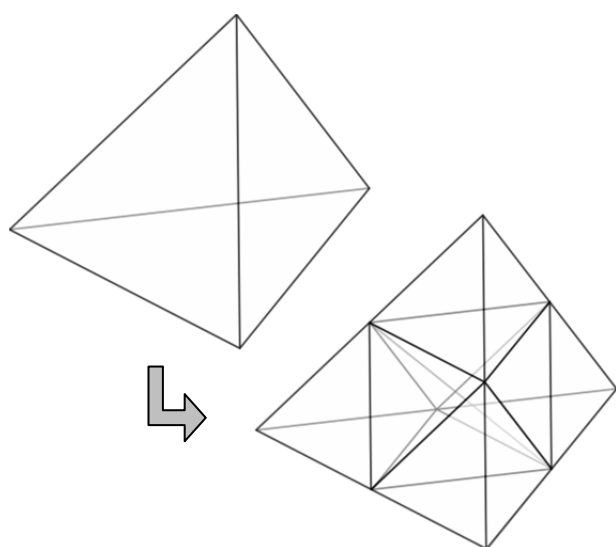


図 24 四面体要素の細分化

このツールは Linux のシェルで実行するもので、次のように入力して実行すると、muf01.inp（もとのメッシュ）と muf01.bcs（もとの面グループ情報）から muf02.inp（細分化されたメッシュ）と muf02.bcs（細分化された面グループ情報）が作成される。

```
refine muf01 muf02
```

メッシュが小さければこのコマンドをフロントエンド環境で実行しても問題ない場合があるが、大きい場合はそれなりの計算リソースが必要になるため、一般には解析同様にバッチジョブとして実行することが望ましい。その後、もとの制御データ muf01.dat を複製してモデル名を muf01 から muf02 に変更し、その他の境界条件ファイルなども同様に複製して名前を変更すれば、muf02 メッシュに対するファイルの準備が完了する。

マフラーモデルに関するリファイン回数とメッシュ規模の関係を表 6 に示す。回数 0 は元のメッシュ（図 3）を意味し、メッシュサイズは約 15 mm である。

表 6 リファイン回数とモデル規模

Num. refine	Num. Nodes	Num. Elements	File Size
0	4,694	22,916	1.74 MB
1	34,234	183,328	13.1 MB
2	259,519	1,466,624	104 MB
3	2,016,557	11,732,992	830 MB
4	15,889,689	93,863,936	6.63 GB

3.2.3. 粗視化ツール “coarse”

解析結果をポスト処理する際、データサイズなどの事情で元の粗さのメッシュに対応するメッシュサイズに戻すための粗視化ツール “coarse” も同梱されている。ただし、このツールを利用した場合は細分化したメッシュでないと確認できない現象が消失してしまう可能性があることに留意する必要がある。すなわち、細かいメッシュを使って解析しているので各節点における結果

は正しいものの、それ以外の場所における（可視化ソフトウェアなどが自動的に適用する）補間を信頼してよいとは限らない。

3.3. 並列計算の実行

Advance/FrontNoise の周波数領域ソルバーは MPI による並列計算が可能である。メッシュが大規模であり、計算機のリソースに余裕がある（CPU のコアが複数利用できる）場合や、スーパーコンピュータを含む計算機クラスターで解析を実行できる場合は並列計算として実行することが、計算時間の短縮に有効である。先ほどの muf02 を 12 並列で計算する場合の典型的なコマンドは次の通りである。

```
mpirun -n 12 fnfem < muf02.dat
```

アプリケーションが適切に並列計算を実行できているかどうかは、mpirun で指定した並列数とログ出力の Number of processors の値が一致しているかどうかで確認できる。出力ファイルなどは今までの計算と同様であるので詳細は割愛する。

本ソフトウェアを利用した大規模モデルの並列計算は一定の時間を必要とする場合が多いため、バッチジョブなどの形で実行することが推奨される。バッチジョブの投入方法を含む計算機クラスターの利用方法はそれぞれの設置機関が提供するマニュアルなどを、また、ノード名の指定方法などに関する詳細は mpirun コマンドのヘルプなどをそれぞれ参照されたい。

表 7 は、公益財団法人計算科学振興財団様が所有・運営するスーパーコンピュータ（FOCUS スパコン D システム¹）において 3 回リファインしたマフラーのモデルを、これまでと同じ条件（1,000 Hz）で種々の並列数について解析を実行した場合の反復回数と処理時間の関係である。全体時間とは fnfem の起動から終了まで、ソルバー時

間とは全体時間のうち解析を実行していた時間で、いずれも現実世界の時間である（CPU 時間の総和ではない）。ソルバー時間は並列数とほぼ反比例の関係にあるが、入出力ファイル処理などの解析以外の部分があるため、全体時間は並列数にかかわらずどこかで頭打ちになる。これは本ソフトウェアにかかわらず、あらゆる分野の並列計算を行うソフトウェアに共通する特性である。

表 7 並列数と実行時間の関係

ノード数	並列数	全体時間	ソルバー時間
1	12	694.0 s	660.0 s
2	24	408.0 s	377.0 s
4	48	244.0 s	205.0 s
8	96	132.0 s	101.0 s
16	192	88.7 s	53.2 s
32	384	71.3 s	33.1 s

3.4. 線形ソルバーの選択

Advance/FrontNoise の周波数領域ソルバーは、解析実行中に連立方程式を解くアルゴリズム（線形ソルバー）をいくつかの中から選ぶことができる。本ソフトウェアにおいては、本節までの例題で使用してきたような数十万要素以下のメッシュであれば直接法（LU 分解を利用する手法）が、これより大きく数千万要素程度であれば GMRES 法（反復法的一种）が、これより大きく 8 億要素以下であれば MG 法（反復法的一种）が速いことが経験的に判明している。

線形ソルバーの指定は、環境変数によって行う。基本的には、fnfem を実行する前に表 8, 表 9, 表 11 のいずれかを指定する。表 10 は表 9 を指定した場合の収束性が思わしくない場合に使用する。これらで設定した内容が適用されているかどうかは、ソルバーの出力の <analysis conditions> 部分にソルバーの種類とパラメータが記載されているかどうかで確認することができる。

各ソルバーによって計算速度（≒収束性）以外にメモリ使用量なども変わるので、利用可能な計

¹ CPU Intel Xeon E5-2670 v2 (20 cores/node); RAM 64 GB/node; Network InfiniBand FDR

算リソースに合わせて調整することが望ましい場合もある。ここで紹介していないソルバーや、これらの数学的な違いについては、ユーザーマニュアルを参照されたい。

表 8 直接法を利用する場合の環境変数

名前	値
FNFEM_SOLVER	80

表 9 GMRES 法を利用する場合の環境変数 1

名前	値
FNFEM_SOLVER	31

表 10 GMRES 法を利用する場合の環境変数 2

名前	値
FNFEM_SOLVER	31
FNFEM_GMRES	300

表 11 MG 法を利用する場合の環境変数

名前	値
FNFEM_SOLVER	36

4. まとめ

本稿では、消音器と防音壁の例題により、内部音響問題および外部音響問題の音響解析を体験していただくための説明をした。ここでは、CAD データから出発し、Advance/REVOCAP を利用したメッシュ作成と計算条件の設定、FOCUS スパコンでの音響解析を実施し、その結果を可視化した。大規模計算のデータ作成には、Advance/ FrontNoise のメッシュ細分化機能を利用し、効率的に大規模計算を実施できることを示した。

本ソフトウェアに関し、お客さまの実章的な問題に対応するために今後も改良を継続して進めていく必要がある。今後のロードマップについては、本号の Advance/FrontNoise の資料を参照いただきたい。

参考文献

[1] 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

[2] 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

[3] 松原聖,尾川慎介,大家史,出浦智之,"音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise Ver. 4.3 の機能追加",アドバンスシミュレーション Vol.18, 2014.10

[4] <https://www.j-focus.or.jp/>

[5] 鈴木昭次, 西村正治ら, “機械音響工学”, コロナ社,2004

※ 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。)