

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise

松原 聖* 大家 史** 尾川 慎介**

Acoustic Simulation Software, Advance/FrontNoise

Kiyoshi Matsubara*, Fumito Ohya** and Shinsuke Ogawa**

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise は、周波数領域または時間領域で有限要素法によりの音響方程式を解くソフトウェアである。このソフトウェアの特長は、大規模並列計算を可能としていることである。本稿では、その計算原理・機能および適用事例を紹介する。

Key word: 音響解析、大規模解析、周波数領域、時間領域、双方向連成、一方向連成

1. はじめに

産業界での製品に対する品質向上への要求から製品全体に対する大規模シミュレーションのニーズが高まっている。また、計算機の性能向上および価格の低下により、大規模な計算により精度の高い解析が可能となってきた。その1つの手段として、当社では、並列化を中心としたシミュレーションの大規模化および高速化を実現するためのソフトウェアの開発に取り組んできた[1]~[10]。

この方針のもと、当社では、音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise を独自に開発し、これまで、機械による環境騒音低減[10]や騒音低下のための機器設計[5][6][8]の一環として、音響シミュレーションに関するサービスを提供してきた。また、音響シミュレーションについては、構造解析における固有値の観点から別のアプローチも行ってきた[7]。

現在では、有限要素法で億を超える要素数を対象に解析を行うことができるようになった。また、ユーザー様からの要望を開発に取り入れることで、大規模計算および音響解析の周辺機能も整備できてきた。本稿では、音響解析ソフトウェアの

機能・理論概要・解析事例および将来的な課題について述べる。

2. 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、解析領域内の粒子速度・音響速度ポテンシャルや音圧レベルを求める。また、空間的に分布する場の流れがある場合には、その流れを考慮した方程式を解く。また、温度場等の設定された密度分布のある場の音響解析も可能である。

周波数領域の Advance/FrontNoise では、音響の基礎方程式を周波数空間に変換し、その周波数空間において離散化して基礎方程式を解く。境界条件には、面に対して境界条件を与える。そこでは、音源の条件、インピーダンス、および、外部境界の条件を与えることができる。また、点音源も与えることができる。これらはいずれも周波数ごとに与えることができる。また、時間領域の Advance/FrontNoise では、時間発展の基礎方程式を直接解く。

離散化においては、解析条件が柔軟に設定可能な有限要素法を適用する。本ソフトウェアでは、どんな複雑形状に対しても容易にメッシュを作成できるように、有限要素法においては、形状適合性の高い四面体1次要素を採用している。本問題はポテンシャル問題であるため、四面体1次要素で精度面でも問題なく解析を実行することが

*アドバンスソフト株式会社 代表取締役社長

President, AdvanceSoft Corporation

**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

可能である。四面体要素を採用していることにより、ユーザーによるメッシュ作成の自由度が大幅に向上している。

周波数領域の機能では、有限要素法で離散化したのちに、自動領域分割による並列化を行う。並列は、MPI を用いて行っている。また、行列解法には、デフォルトとして GMRES 系の反復解法を採用しているが、その他の代表的な前処理手法・反復法および直接法も利用可能である。解析結果は、音響ポテンシャル、音圧、粒子速度、音圧レベルを出力できる。また、解析結果については、いくつかの周辺ツールにより編集し、音響特性等を求めることができる。

表 1 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）を要素ごと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、周波数ごと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	周波数ごと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、 ρc 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 1 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
	大規模実績	4 億要素・8000 万節点（四面体 1 次要素）
解析結果		周波数ごと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。
-------	--

また、我々は 2014 年 4 月から音響解析の時間領域解析機能も提供している。この音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise/ TD の機能一覧を下表に示す。本ソフトウェアでは、外部領域・内部領域にかかわらず、音圧と粒子速度の波の方程式を時系列で解く。音の伝搬する媒体の物性値は全領域で一定とする。境界条件としては、点音源、壁にインピーダンスを与える条件、開口部等を模擬する無反射境界、拡散反射境界である。数値解法としては有限要素法を陽解法で解く。また、自動領域分割で MPI による並列化を行っている。今後、機能の追加を行っていく予定である。

周波数領域および時間領域の機能に関しては、ユーザーにはコア数制限なしの並列計算機能を提供している。

表 2 Advance/FrontNoise/TD の標準機能

項目		機能
基礎方程式		音圧と粒子速度の波の方程式を時系列で解く
解析領域		内部領域、および外部領域
物性値等		場で一定とする
境界条件	点音源	節点に時系列でエネルギーを設定可能
	インピーダンス	壁境界に音響インピーダンスを設定可能
	透過境界	面（外部境界）に ρc 境界を設定可能
	拡散反射境界	拡散反射境界部分に拡散反射条件を設定可能
数値解法	離散化	有限要素法
	要素	四面体 1 次要素
	時間積分	陽解法
	並列計算	自動領域分割で MPI で並列化
解析結果		音圧等を指定された出力間隔でファイル出力 定点の音圧等の時系列データをファイル出力 音圧等をある区間で平均化して出力

以上で述べたように 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 での稼働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。

3. 理論概要

3.1. 周波数領域における基礎方程式

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。当然その式は、速度なしの場合の拡張となっている。具体的には、文献[11]の 1.2 節、5.2 節等、および文献[12]の 11.1 節の定式化に基づく。また、速度ありの基礎方程式の離散化については、広く利用されている有限要素法を利用して計算を行う。これらの文献で述べられている速度を含んだ音響解析の基礎方程式 convected wave equation は、

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

を用いた形に変形すると

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

である。ここで、 Ψ は音響速度ポテンシャル、 ρ 、 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、

$$\frac{D_0}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_0 \cdot \nabla \quad (3)$$

である。これを、周波数領域で解く。この場合には、

$$\Psi(x,t) = \sum_{\nu=1,\infty} \phi(x) e^{-i\omega t} \quad (4)$$

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、

$$P(x,t) = -\rho \frac{D\Psi(x,t)}{Dt} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} P(x,t) &= \sum_{\nu=1,\infty} p(x) e^{-i\omega t} \\ &= -\rho \frac{D}{Dt} \left(\sum_{\nu=1,\infty} \phi(x) e^{-i\omega t} \right) \\ &= -\rho \sum_{\nu=1,\infty} (-i\omega \phi + v_0 \cdot \nabla \phi) e^{-i\omega t} \end{aligned} \quad (6)$$

$$p(x) = -\rho (-i\omega \phi(x) + v_0 \cdot \nabla \phi(x)) \quad (7)$$

となる。音響速度ポテンシャルを書き換える。

$$\begin{aligned} \frac{D}{Dt} \Phi(t,x) &= \left(\frac{\partial}{\partial t} + Mc \cdot \nabla \right) \phi(x) e^{-i\omega t} \\ &= \{-i\omega \phi(x) + Mc \cdot \nabla \phi(x)\} e^{-i\omega t} \end{aligned} \quad (8)$$

また、

$$\nabla \cdot \rho \nabla \Phi(t,x) = \rho \nabla \cdot \nabla \phi(x) e^{-i\omega t} \quad (9)$$

である。以下の記述では、

$$M \cdot \nabla = M_x \frac{\partial}{\partial x} + M_y \frac{\partial}{\partial y} + M_z \frac{\partial}{\partial z} \quad (10)$$

であり、

$$\begin{aligned} (M \cdot \nabla)^2 &= \left(M_x \frac{\partial}{\partial x} + M_y \frac{\partial}{\partial y} + M_z \frac{\partial}{\partial z} \right) \\ &\quad \left(M_x \frac{\partial}{\partial x} + M_y \frac{\partial}{\partial y} + M_z \frac{\partial}{\partial z} \right) \\ &= M_x^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} + M_y^2 \frac{\partial^2}{\partial y^2} + M_z^2 \frac{\partial^2}{\partial z^2} \\ &\quad + 2M_x M_y \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} + 2M_y M_z \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} + 2M_z M_x \frac{\partial^2}{\partial z \partial x} \end{aligned} \quad (11)$$

である。これを用いて、

$$\begin{aligned} &\frac{D}{Dt} \left(\frac{\rho}{c^2} \frac{D}{Dt} \Phi(t,x) \right) \\ &= \frac{D}{Dt} \left(\frac{\rho}{c^2} \{-i\omega \phi(x) + Mc \cdot \nabla \phi(x)\} e^{-i\omega t} \right) \\ &= \left(\frac{\partial}{\partial t} + Mc \cdot \nabla \right) \\ &\quad \left(\frac{\rho}{c^2} \{-i\omega \phi(x) + Mc \cdot \nabla \phi(x)\} e^{-i\omega t} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

さらに

$$\begin{aligned}
&= -i\omega \frac{\rho}{c^2} \{-i\omega\phi(x) + Mc \cdot \nabla\phi(x)\} e^{-i\omega t} \\
&+ \frac{\rho}{c^2} Mc \cdot \nabla \{-i\omega\phi(x) + Mc \cdot \nabla\phi(x)\} e^{-i\omega t} \\
&= \left(-\frac{\rho}{c^2} \omega^2 \phi(x) - i\omega \frac{\rho}{c^2} Mc \cdot \nabla\phi(x) \right) e^{-i\omega t} \\
&+ \left(-i\omega \frac{\rho}{c^2} Mc \cdot \nabla\phi(x) + \frac{\rho}{c^2} (Mc \cdot \nabla)^2 \phi(x) \right) e^{-i\omega t}
\end{aligned} \tag{13}$$

となり、

$$\begin{aligned}
&= \left(-\frac{\rho}{c^2} \omega^2 \phi(x) - 2i\omega \frac{\rho}{c^2} Mc \cdot \nabla\phi(x) \right. \\
&\quad \left. + \frac{\rho}{c^2} (Mc \cdot \nabla)^2 \phi(x) \right) e^{-i\omega t} \\
&= \rho e^{-i\omega t} \left(-\frac{\omega^2}{c^2} \phi(x) - 2i \frac{\omega}{c} M \cdot \nabla\phi(x) \right. \\
&\quad \left. + (M \cdot \nabla)^2 \phi(x) \right)
\end{aligned} \tag{14}$$

と整理できる。さらに、

$$\begin{aligned}
&\rho e^{-i\omega t} \left(-\frac{\omega^2}{c^2} \phi(x) - 2i \frac{\omega}{c} M \cdot \nabla\phi(x) + (M \cdot \nabla)^2 \phi(x) \right) \\
&- \rho \nabla \cdot \nabla\phi(x) e^{-i\omega t} = 0
\end{aligned} \tag{15}$$

である。従って、最終的に、周波数領域での音響方程式は、

$$\begin{aligned}
&\nabla \cdot \nabla\phi(x) - (M \cdot \nabla)^2 \phi(x) \\
&+ 2ikM \cdot \nabla\phi(x) + k^2 \phi(x) = 0
\end{aligned} \tag{16}$$

$$k = \frac{\omega}{c} \tag{17}$$

と書くことができる。これを書き下すと

$$\begin{aligned}
&\nabla \cdot \nabla\phi(x) - (M \cdot \nabla)^2 \phi(x) + 2ikM \cdot \nabla\phi(x) + k^2 \phi(x) = 0 \\
&M_x^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} + M_y^2 \frac{\partial^2}{\partial y^2} + M_z^2 \frac{\partial^2}{\partial z^2} \\
&+ 2M_x M_y \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} + 2M_y M_z \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} + 2M_z M_x \frac{\partial^2}{\partial z \partial x}
\end{aligned} \tag{18}$$

であり、具体的に、周波数領域の基礎方程式を書き下すと、

$$\begin{aligned}
&(1 - M_x^2) \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + (1 - M_y^2) \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + (1 - M_z^2) \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \\
&- \left(2M_x M_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} + 2M_y M_z \frac{\partial^2 \phi}{\partial y \partial z} \right. \\
&\quad \left. + 2M_z M_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial z \partial x} \right) \\
&- 2ik \left(M_x \frac{\partial \phi}{\partial x} + M_y \frac{\partial \phi}{\partial y} + M_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + k^2 \phi = 0
\end{aligned} \tag{19}$$

となる。ここで、

$$M_x = \frac{u}{c}, \quad M_y = \frac{v}{c}, \quad M_z = \frac{w}{c} \tag{20}$$

とした。確認のため、速度なしの式は、

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + k^2 \phi = 0 \tag{21}$$

である。(19)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。

3.2. 周波数領域における境界条件

境界条件は、各周波数成分 $\phi(x)$ に対して、

$$\begin{aligned}
&\alpha(x)\phi(x) + \beta(x) \frac{\partial \phi(x)}{\partial n} = f(x) \\
&\text{on } \partial\Omega
\end{aligned} \tag{22}$$

の混合境界条件を課す。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。境界条件について、具体的に与える量（係数）を、時系列圧力、時系列速度、時系列変位・加速度、および、インピーダンス境界、完全反射、完全吸収の場合について示す。

表 3 境界条件の設定方法

境界条件	$\alpha(x)$	$\beta(x)$	$f(x)$	備考
時系列圧力	$i\omega\rho$	0	$-p_i(x)$	流体音響連成
時系列速度	0	1	$v_i(x)$	構造音響連成
時系列変位・加速度 インピーダンス	0	1	$-i\omega u_i(x) - \frac{1}{i\omega} a_i(x)$	構造音響連成
完全反射	$i\omega\rho$	$-Z$	0	
完全吸収	0	1	0	デフォルト
	$i\omega\rho$	ρc	0	ρc 境界

3.3. 時間領域における定式化

本ソフトウェアの特長はその数値計算アルゴリズムにある。計算原理については、これまで差分法に適用されていた手法（FDTD 法）を有限要素法に適用した。これまで、そのような手法は論文レベルで存在してはいたものの、処理時間が遅い等の理由で広く利用されていなかった。今回、いくつかの工夫を行い、有限要素法に適用する手法を開発して、時間領域での音響シミュレーションを有限要素法で行うことを可能にした。

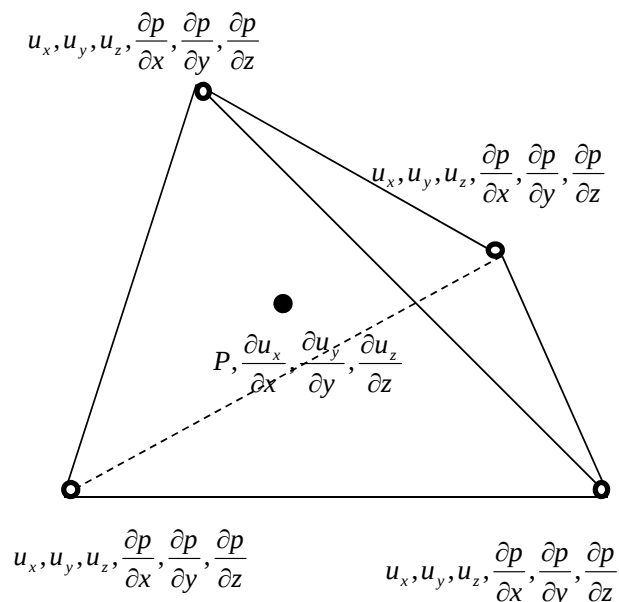


図 1 格子点における物理量の配置

また、有限要素法については、従来から数値計算のソフトウェアに適用されてきた並列化で高速化する手法を適用することで、かなり高い並列性能を得た。

以上のことから、本ソフトウェアにおいては、

有限要素法を利用することで形状適合性の高いメッシュを適用できるとともに、差分法で利用されている手法を有限要素法に適用することで高速に処理を行うことを可能とした。

4. 解析事例

4.1. 事例 1：大規模音響解析

4.1.1. 解析概要

本検証では、ここで利用している計算機環境において、どの程度の規模までの解析が実行でき、また、さらなる大規模化に対する課題等について検討するための材料を示すことを目的とした。

本稿では、特に断りのない限り、次の計算機環境を利用した。次の仕様の 10 ノードの計算機システムのうち最大 4 ノードを利用して解析を実施した。

表 4 使用計算機の仕様

項目	内容
CPU	Intel Xeon X5660 2.80GHz
ノード構成	10 ノード×12 コア
メモリ	96GB／ノード
スワップ	96GB／ノード
キャッシュ	12MB／ノード

4.1.2. 解析モデル

1 辺 1m の立方体の内部に音源を設定するモデルで、メッシュサイズを自由に設定できるモデルとした。音源には、立方体の中央位置に単極子音源、双極子音源、四重極音源を設定した。また、立方体の周囲は完全反射の壁とした。

解析モデルの規模としては、次のような大きさの規模のデータを用いた。

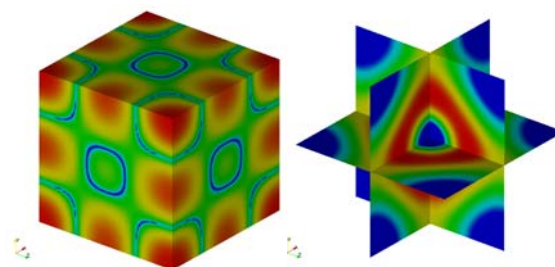


図 2 単極子の結果（左；立方体表面の速度ポテンシャル分布、右；中央断面の音圧レベル）

表 5 検証例題の規模

要素数	節点数	自由度
92,629,494	15,625,000	31,250,000
116,790,654	19,683,000	39,366,000
137,437,824	23,149,125	46,298,250
160,385,394	27,000,000	54,000,000
185,754,864	31,255,875	62,511,750
255,051,294	42,875,000	85,750,000
301,460,454	50,653,000	101,306,000
381,127,194	64,000,000	128,000,000
425,747,664	71,473,375	142,946,750

4.1.3. 解析結果

ここで示す処理時間等の測定結果は、双極子の問題で計測した数字である。単極子音源、双極子音源、四重極音源のいずれの場合にも下記のような妥当な結果を得ており、データをとるためには妥当な問題であることが分かる。

図に、1.6 億要素の場合の収束履歴を示す。収束履歴においては、このケースでは、特に問題ないことが分かる。

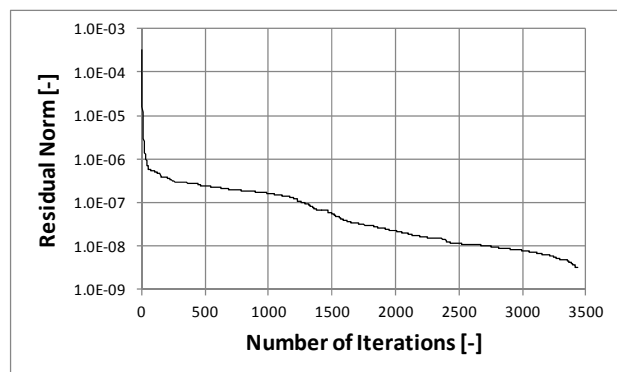


図 3 収束履歴 (1.6 億要素)

4.1.4. 並列性能

ここでは、24 コア、36 コア、48 コアでの並列性能の比較を示す。24 コアでは、192GB の主記憶容量が利用可能であり、このサイズで処理可能な 1.4 億要素までのデータに限定して、この 3 つのケースの処理時間を測定した。

この結果、24 コアと 48 コアを比較した場合には、ほぼ倍程度の処理速度が出ており、並列性能は、ほぼ問題ないと考えられる。

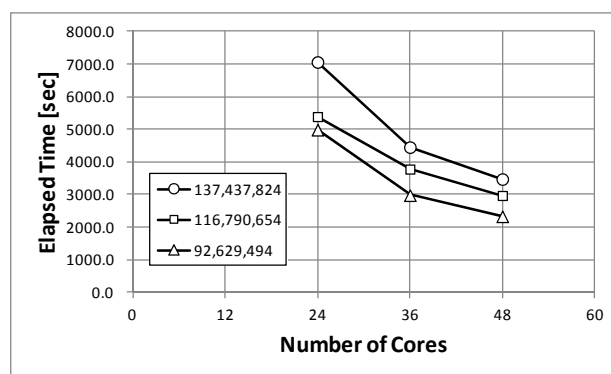


図 4 並列性能 (凡例の数字は要素数)

4.1.5. 処理速度とメモリ

Advance/FrontNoise の大規模データに対する処理速度とメモリを計測した。ここでは、3 系列のデータを示した。

処理速度については、下記に示す通りである。1 つのデータは、1PEs で実行に換算した結果である。2 つめのデータは 12PE で実行した結果である。3 つめのデータは 48PE で計測したデータである。このうち、△枠の印が実際に実行したデータをとった値である。その他については、他のデータから補間等を行ったデータである。

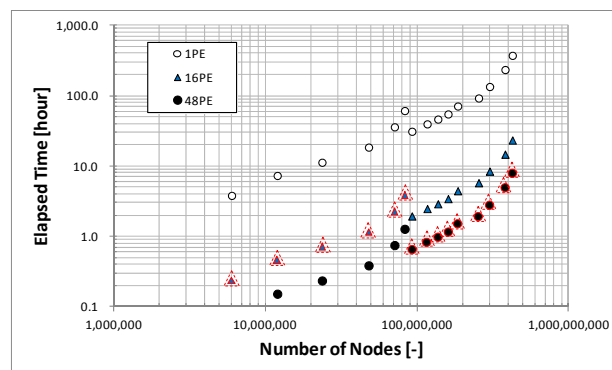


図 5 要素数と処理速度

メモリについては、下記の通りである。ここでは、48CPU、392GB のメモリ (+同程度のスワップ 392GB) の計算機環境で実施した。黒い線が必要なメモリ量であり、当社の環境では、この値がメモリ+スワップで、784GB 以下であれば、データを実行できる。すなわち、グラフから読み取ると、7 千万節点、4 億要素まで実行できることが分かる。実際に、71,473,375 節点、425,747,664 要素のデータを実行することができた。

ただし、次のことに注意しなければならない。一般的なことではあるが、スワップを利用するようになると極端に処理速度が落ちることが分かる。この表で実際に計測した値は△枠の印であり、16PE の測定系列はメモリ 64GB（スワップ 64GB）の環境で実行したものである。スワップを利用する領域になると処理速度が落ちることが分かる。また、48PE の系列は下記に示す 392GB（スワップ 392GB）の環境で実行したものであり、これについても、スワップを利用する領域になると処理速度が落ちることが分かる。スワップの設定がなければ、メモリの限界まで処理速度が落ちることはない。

例えば、本資料に示したデータから、メモリが 512GB でありスワップの設定がない環境におけるデータサイズのぎりぎり上限を考えると、5 千万節点、2 億 5 千万要素程度まで解析可能であることが分かる。

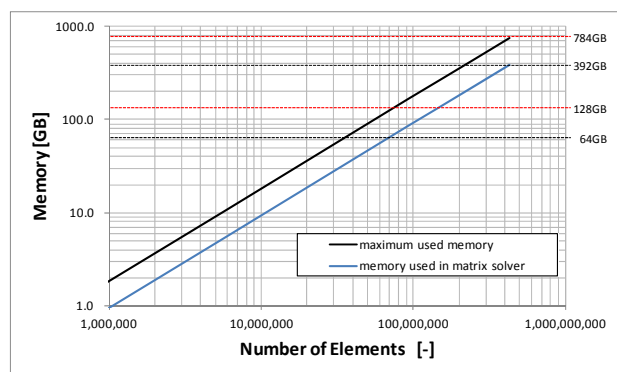


図 6 要素数と使用記憶容量

4.2. 事例 2：構造音響強連成解析

4.2.1. 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。

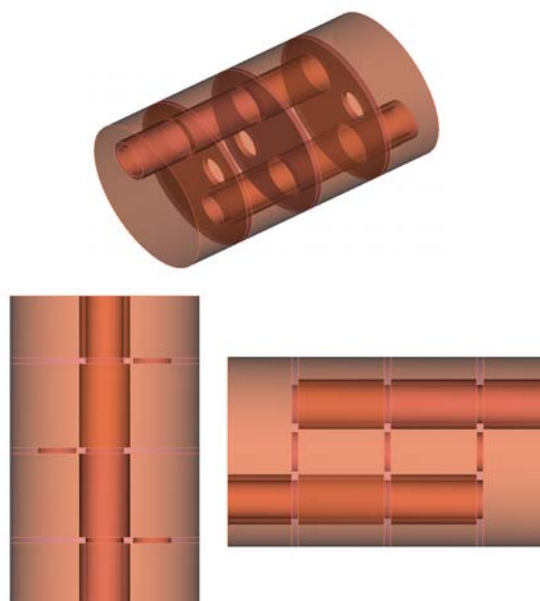


図 7 解析形状

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。

4.2.2. 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		

4.2.3. 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。

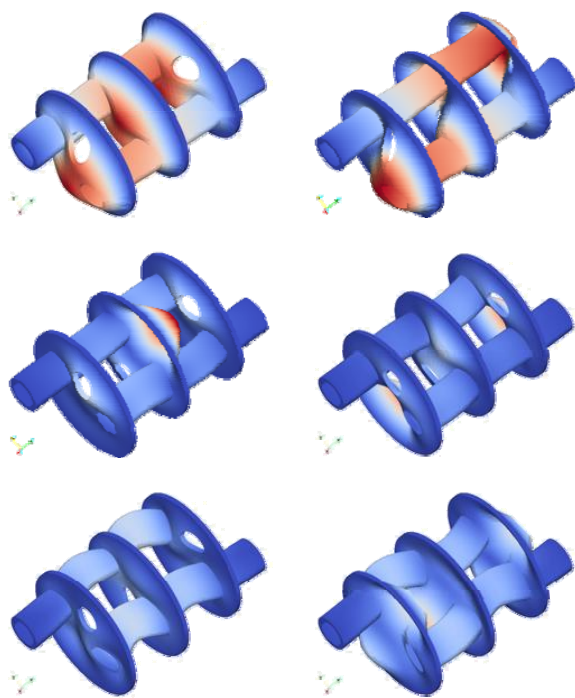


図 8 固有ベクトルの表示
(それぞれ左上から右に、第 1,2,4,5,7,9 次モード)

4.2.4. 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

$$\alpha = 1e-5, \beta = 10 \quad (23)$$

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。

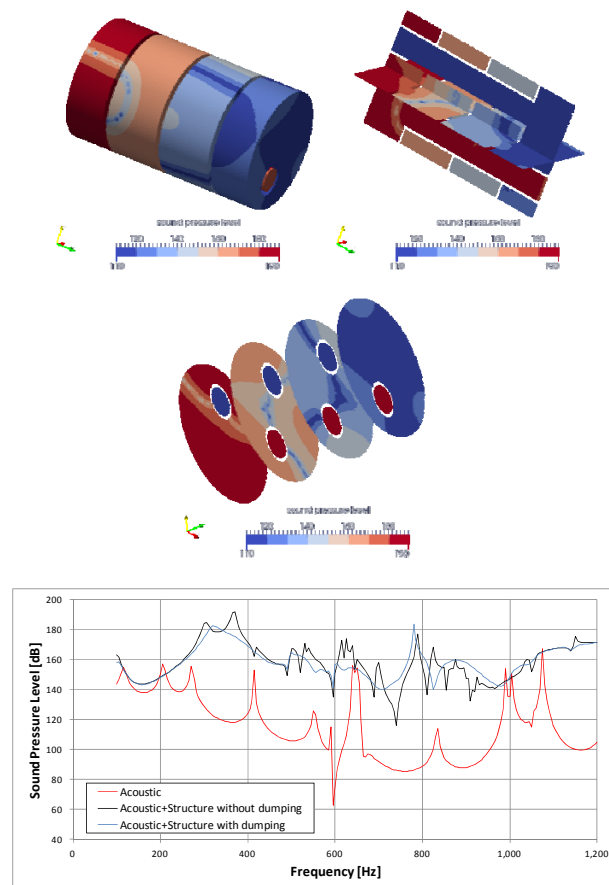


図 9 3 ケースの解析結果の比較

4.2.5. 考察

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。

4.3. 事例 3：時間領域音響解析

本節の使用例では、工場の内部騒音の時系列解析を行うことを例にとって、本ソフトウェアの使用方法について説明する。下記の領域の大きさは、 $40\text{m} \times 30\text{m} \times 60\text{m}$ の大きさであり、工場等の建屋を想定していくつかの形状を配置していく。これらは仮想的な形状であり、斜め形状および曲線部のある形状を取り扱うために作成したデータである。有限要素法による特徴のあるメッシュを作成するためにこのような例とした。

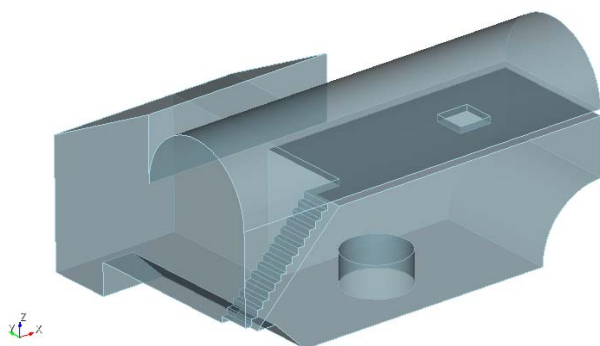


図 10 使用例における形状データ

Advance/REVOCAP と同様に、CAD データを読み込み、四面体 1 次メッシュを作成する。次に、ABAQUS 形式でメッシュをファイル出力する。最後にツール aba2inp で Advance/FrontNoise 用のファイルに変換する。この場合には、*.inp ファイルおよび*.bcs ファイルのみが必要である。ここでは、「nfind」コマンドで得た音源から 2m おきの節点で出力した。その波形を示す。それぞれ時間遅れで波が到達していることが分かる。

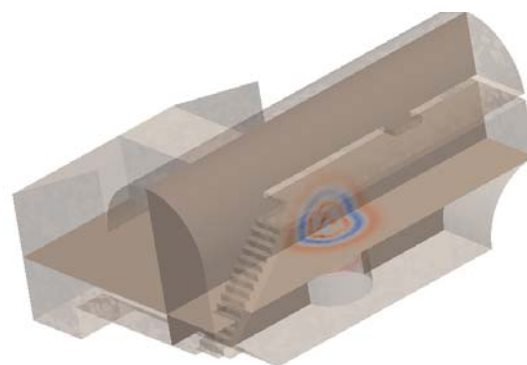


図 11 解析結果（解析開始直後）

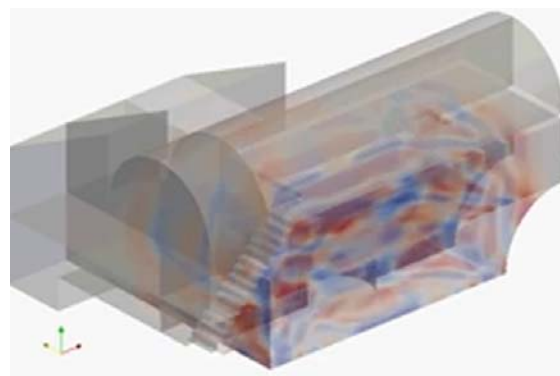


図 12 解析結果

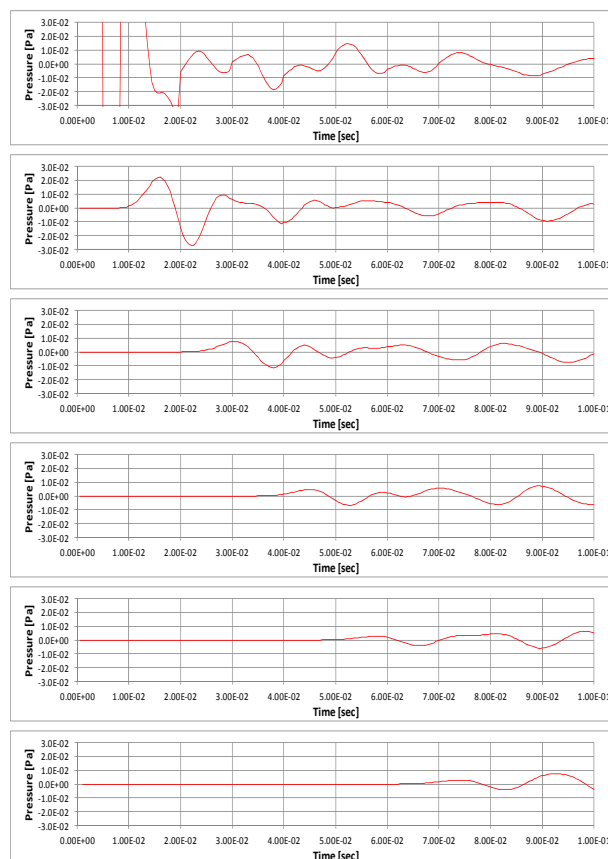


図 13 観測点での時系列グラフ

表 7 時間領域機能で利用したデータ

	節点数	要素数	リンク数
h01	320, 470	1, 785, 277	7, 141, 088
h02	2, 474, 445	14, 282, 176	57, 128, 704
h03	19, 423, 998	114, 257, 408	457, 029, 632

表 8 時間領域機能の処理時間

データ	ファイル入力	前処理	時間進行 /20steps	使用 メモリ
h01	4.97sec	1.55sec	2.4sec	300MB
h02	33.0sec	9.5sec	18.9sec	3GB
h03	263sec	73.4sec	148.0sec	27GB

5. まとめ

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise は、これまで、大規模解析および他のソフトウェアとの連成解析を行うことに力を入れて開発およびリリースを行ってきた。今後とも、これらの点に力を入れて改良を重ねていくとともに、ユーザー様のご要望を取り入れながら、本ソフトウェアを進化させていく予定である。

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, 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
- [4] 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
- [5] 松原 聖, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise の透過音解析機能”, アドバンスシミュレーション Vol.16, 2013.8
- [6] 松原 聖, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise による流れを伴うダクト開口端反射率の評価 (第 1 報)”, アドバンス

シミュレーション Vol.17, 2013.12

- [7] 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
- [8] 松原聖, “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”, アドバンスシミュレーション Vol.18, 2014.10
- [9] 松原聖, 末光啓二, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise の時間領域解析機能およびその並列処理性能”, アドバンスシミュレーション Vol.18, 2014.10
- [10] 加藤國男, 大家史, 松原聖, “船舶居住区騒音を対象とした構造音響連成解析手法”, アドバンスシミュレーション Vol.18, 2014.10
- [11] P.M.Morse, K.U.Ingard, "Theoretical Acoustics", Princeton University Press 1986
- [12] H.S.Howe, "Theory of Vortex Sound", Cambridge University Press, 2003
- [13] 鈴木 昭次, 西村 正治ら, “機械音響工学”, コロナ社, 2004
- [14] C.A.Wagner, T.Huttl, P.Sagaut, "Large -Eddy Simulation for Acoustics", Cambridge University Press, 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。)