

平成 26 年度 TSUBAME 産業利用トライアルユース 成果報告書

利用課題名 減衰を考慮した高周波数領域までの音響構造連成シミュレーション大規模化技術の検討
英文: Study of large scale simulation technology of acoustic-structural coupling
with dumping at a high frequency range

利用課題責任者 笹島 学
Manabu Sasajima

所属 フォスター電機株式会社
Foster Electric Co., Ltd.
URL <http://www.foster.co.jp>

邦文抄録

小型の音響機器は、狭い音響伝達経路での空気の粘性による減衰効果の影響が相対的に大きくなる。しかし、一般的な音響解析手法はこの影響が少ないものとして、無視して行われることが多い。また、解析対象とする周波数を人の可聴周波数帯域とした場合、特に高い周波数での振動を表現するには、波長に依存した非常に小さなサイズの要素分割が必要となる。しかし、要素数が膨大となり、計算規模が大幅に増加してしまう問題が生じるため実用的な解析は困難であった。本件は空気粘性を考慮した、可聴域の高周波数帯域までの音響構造連成シミュレーション実用化のための大規模解析手法を検討する。

英文抄録

In the case of small audio equipment, effect of damping of the attenuation material and the shape of the acoustic transmission path effect are larger than the case of general audio equipment. However, acoustic analysis is performed without regard to this effect in general. The audible frequency band of human frequency to be analyzed, the element size must be very small size that depends on the wavelength. However, analysis became difficult by large number of elements. This study is to examine the large-scale analysis for structural acoustic coupled simulation that considers the air viscosity.

Keywords: 音響機器、有限要素法、音響構造連成解析、空気粘性

背景と目的

イヤホンなどの小型の音響機器では、音響伝達経路の狭さによる減衰効果が音響特性に与える影響が他の音響問題と比べて相対的に大きい。しかし、一般的によく行われている音響解析手法は空気の粘性による影響が少ないものとして、この影響を無視して行われることが多い。よって、一般的な音響解析手法を小型の音響機器に適用すると、実験結果とは大きく異なったシミュレーション結果となってしまう。また、特に閉じた狭い空間では音源となる振動板の振動が周囲の空気の圧力変動による影響を受けることもわかっているが、一般的な音響解析手法は空気の圧力である音圧を未知数として定式化されるため、音源となる振動板の振動を、音響解析と連成させて解析することは簡単ではなかった。一方、解析対象とする周波数の範囲を、人の可聴周波数帯域とされている 20Hz から 20kHz とした場合に、特に高い周波数で振動の現象を表現するためには、波長に依存した要素サイズが必要となることから、要素

の最大サイズを約 3mm 以下にする必要がある。さらに、空気要素の節点変位を未知数として定式化した場合は、スムーズに節点を変位させるため、さらに領域の要素分割数を増やし、要素サイズを小さくする必要がある。しかし、解析モデルの要素数が膨大となり、計算規模が大幅に増加してしまう問題が生じ、一般的なワークステーションでは実用的な解析は困難であることがわかってきた。さらに、スーパーコンピュータ TSUBAME を用いても、その解析時間から、所望の解析を行うことは難しいことがわかった。本件ではスーパーコンピュータ TSUBAME を用いて空気の粘性を考慮した、可聴域の高周波数帯域までの音響構造連成大規模解析のシミュレーション実用化のための手法を検討する。

概要

(1) 音響構造連成有限要素の定式化

直交デカルト座標系と、四面体定ひずみ要素を考える。要素内の任意の点での x 方向変位を u_x 、 y 方向変位

を u_x, z 方向変位を u_z とすると、ひずみエネルギー $\tilde{U}$ は以下のように表せる。

$$\tilde{U} = \frac{1}{2} E \iiint_e \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 dx dy dz \cdots (1)$$

ここで、 E は体積弾性率である。変位の時間微分を $\dot{u}$ と表現すると、運動エネルギー $\tilde{T}$ は以下のように表せる。

$$\tilde{T} = \frac{1}{2} \iiint_e \rho \{\dot{u}\}^T \{\dot{u}\} dx dy dz \cdots (2)$$

ここで、 ρ は要素密度、 T は転置行列を表す。また、粘性エネルギー $\tilde{D}$ は以下のように表せる。

$$\tilde{D} = \iiint_e \frac{1}{2} \{\bar{T}\}^T \{\Gamma\} dx dy dz \cdots (3)$$

$\{\bar{T}\}$ は粘性による応力ベクトル、 Γ はひずみベクトルである。さらに、ポテンシャルエネルギー $\tilde{V}$ は以下のように表せる。

$$\tilde{V} = \int_{\Gamma} \{u\}^T \{\bar{P}\} d\Gamma + \iiint_e \{u\}^T \{F\} dx dy dz \cdots (4)$$

ここで、 $\{\bar{P}\}$ は表面力ベクトル、 $\{F\}$ は物体力ベクトル、 $\int_{\Gamma} d\Gamma$ は要素境界での積分を表す。次に、粘性減衰を考慮した音響解析モデルとして要素運動方程式の定式化を考える。全エネルギー $\tilde{E}$ は次式となる。

$$\tilde{E} = \tilde{U} + \tilde{D} - \tilde{T} - \tilde{V} \cdots (5)$$

さらに、以下のラグランジュの方程式を用いると、要素離散化方程式が求められる。

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \dot{u}_{ei}} - \frac{\partial \tilde{T}}{\partial u_{ei}} + \frac{\partial \tilde{U}}{\partial u_{ei}} - \frac{\partial \tilde{V}}{\partial u_{ei}} + \frac{\partial \tilde{D}}{\partial u_{ei}} = 0 \cdots (6)$$

ここで、 $\{u_e\}$ 、 $\{\dot{u}_e\}$ は節点変位ベクトル、節点速度ベクトルである。式(1)～式(4)を用いて式(6)を整理すると、次の要素離散化方程式を得る。ただし、変位は角周波数 ω の周期応答としている。

$$-\omega^2 [M_e] \{u_e\} + [K_e] \{u_e\} + j\omega [C_e] \{u_e\} = \{f_e\} \cdots (7)$$

ここで、 $[M_e]$ 、 $[K_e]$ 、 $[C_e]$ はそれぞれ要素質量行列、要素剛性行列、要素減衰行列である。また、 $\{f_e\}$ は節点力ベクトルである。この方程式を変位について解けば、全ての節点変位が求められる。

(2) プログラムについて

プログラムの開発言語は FORTRAN、コンパイラは Intel コンパイラを用いている。このプログラムを用い、TSUBAME 上で約100万要素の構造音響連成モデルを解析してみたところ 1 周波数あたり約90時間かかることがわかった。全可聴領域の周波数特性を把握するためには少なくとも数十回の解析が必要になることを考えると、一つの周波数特性を得るために1から2カ月かかることになり、解析時間が実用上の大きな問題となっていた。そこで、行列ソルバの改良により解析時間の短縮をはかった。

目標は従来プログラムを用いた場合の解析時間の十分の一以下とし、実用化の数値目標としては、100 万要素程度のモデルを解析する場合の解析時間を、1 周波数あたり「30 分以下」とした。この場合、20 周波数分の計算を約10時間でできるため、実用的な計算時間であると考えた。プログラムの計算プロセスごとの時間を調査したところ、解析時間の大半はスカイライン法による複素連立1次方程式を解くプロセスに費やされていることが分った。そこで、プログラムの行列ソルバを効率の良いものに入れ替え、解析時間全体の短縮を試みた。

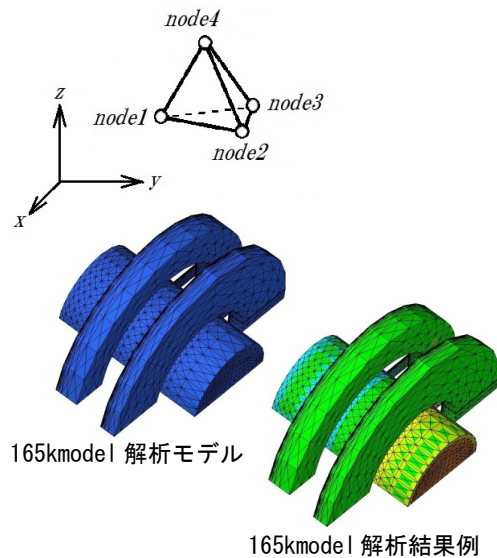


図1 使用した四面体要素と解析モデル、解析例

今回は、直接法で比較的取り扱いが容易ということで、インテルのマスキーネライブラリ(MKL)から直接法の疎行列連立一次方程式ソルバである PARDISO を

導入した。PARDISO は、大規模な疎行列対称連立線形方程式を解くことができ、高速で、メモリ効率がよく、安定しているソフトウェアとされている。また、複素連立線形方程式も解くことが可能である。

結果および考察

図1に今回使用した四面体要素、および例として、約165,000要素の解析モデルと解析結果を示す。また、解析に用いた全てのモデル名称と概略の要素数を表1にまとめる。各モデルの要素は全て四面体で、節点はx、y、z方向の3自由度を持っているが、境界条件や形状等は統一していないので、計算の条件としては完全に同一にはなっていない。

図2に行列ソルバにスカイライン法を用いた従来プログラムと、行列ソルバを PARDISO に置き換えたプログラムを用いた解析について、各解析モデルの解析時間を示す。縦軸の解析時間は対数目盛りとしてある。PARDISO を用いることによって、どのモデルにおいても解析時間は約100分の1となっていることが分る。可聴領域全域の周波数特性を把握するためには少なくとも数十回の解析を繰り返すことを考えると、実用上の効果は非常に大きいと思われる。たとえば、これまで1カ月必要であった周波数特性を得るための計算が半日でできるようになった。

また、この計算時のメモリ使用量をまとめ図3に示す。この図より、PARDISO を用いることによって、どのモデルにおいても使用メモリ量は約4分の1となっていることが分る。従来プログラムと比べ大幅に使用メモリの削減ができていることが確認できた。

表1 テストモデル名および概略要素数

モデル名	概略要素数(個)
50K model	50,000
165K model	1,650,000
600K model	600,000
1M model	1,000,000

まとめ、今後の課題

スーパーコンピュータ TSUBAME を用いた空気の粘

性を考慮した可聴域の高周波数帯域までの音響構造連成大規模解析のシミュレーション実用化のため、解析の効率化手法を検討した。

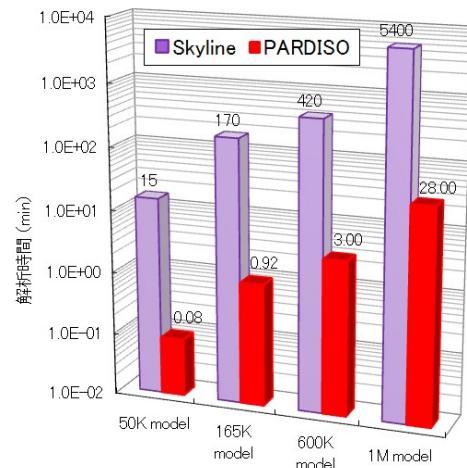


図2 各モデルの解析時間比較

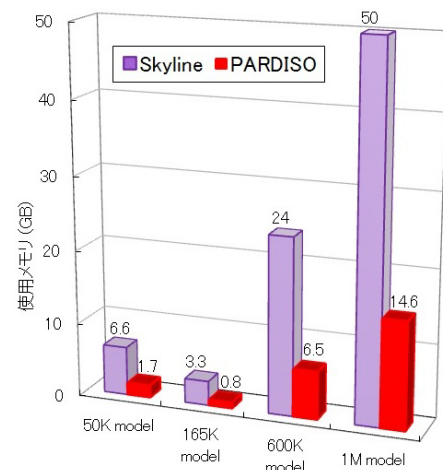


図3 各モデルの使用メモリ量比較

従来のプログラムでは、解析時間が実用上の大きな問題となっていた。そこで、行列ソルバの改良により解析時間の短縮を図った。今回は疎行列連立一次方程式の直接法ソルバである PARDISO を導入し、いくつかのモデルを計算してみたところ解析時間が約100分の1、使用メモリ量が約4分の1になった。よって、本検討での目標は十分に達成できた。

今後、従来解析が困難であった全可聴帯域での、高精度の音響解析シミュレーション技術の実用化が進むと考えられる。引き続き、PARDISO の解析規模の上限を確認するとともに、場合によってはさらなる大規模化のため、反復法の行列ソルバも試していきたい。